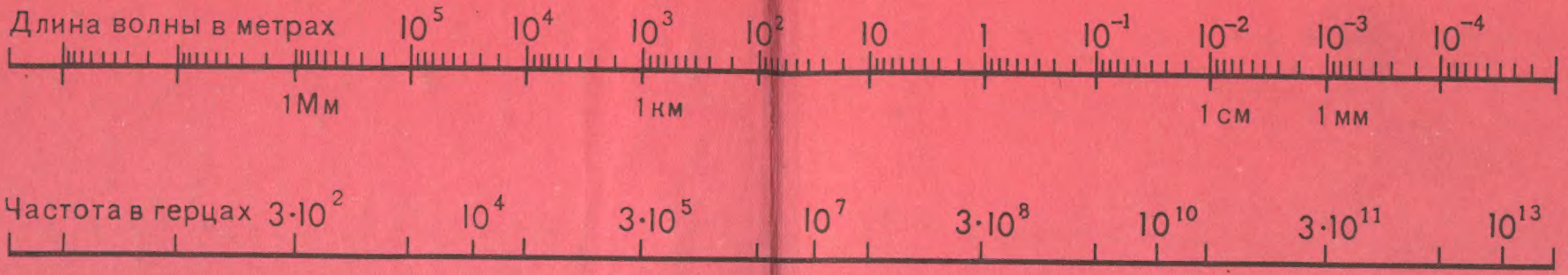
Г. Я. МЯКИШЕВ, Б. Б. БУХОВЦЕВ

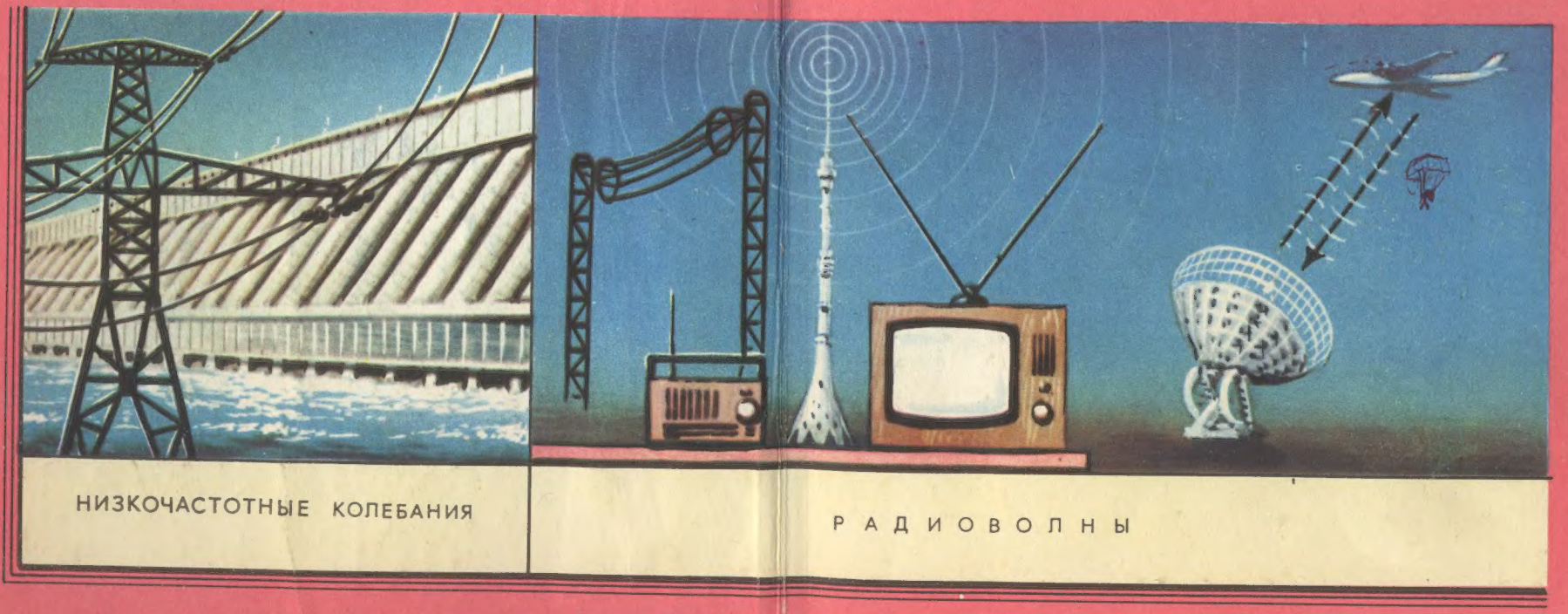
ФИЗИКА

10

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ



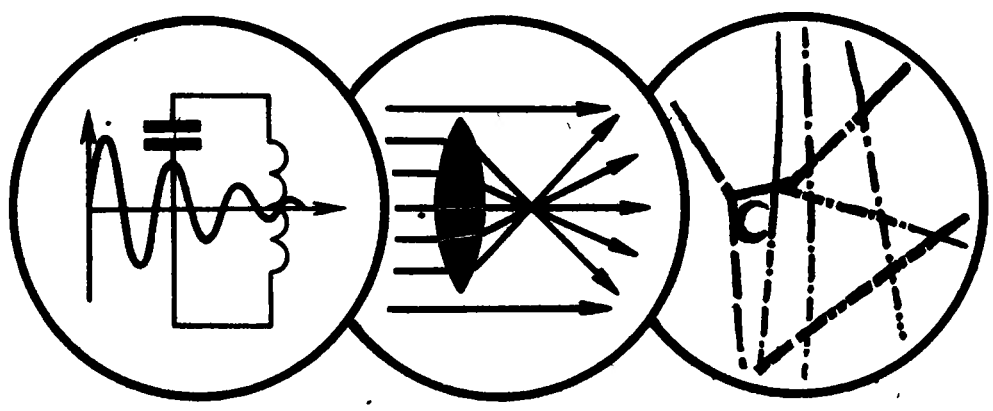


НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

РАДИОВОЛНЫ

Г. Я. МЯКИШЕВ
Б. Б. БУХОВЦЕВ

ФИЗИКА



УЧЕБНИК ДЛЯ 10 КЛАССА
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

Утвержден
Министерством просвещения СССР

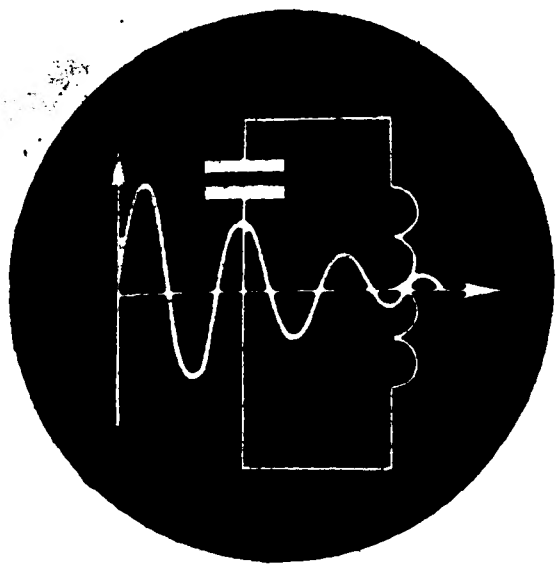
ИЗДАНИЕ ШЕСТОЕ

МОСКВА
ПРОСВЕЩЕНИЕ 1982

ББК 22.3я72
М99

М $\frac{60601-132}{103(03)-82}$ инф. письмо 4306021100

© Издательство «Просвещение», 1977 г.



КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ВВЕДЕНИЕ

До сих пор при изучении физики мы придерживались определенной последовательности. В VIII классе рассматривалось механическое движение: изменение положения тел (или их частей) друг относительно друга в пространстве с течением времени. В IX классе, изучая термодинамику и молекулярную физику, мы познакомились с тепловыми процессами. Вторая половина курса физики IX класса была посвящена электромагнитным явлениям. Но изучение электродинамики не было закончено. Нужно еще познакомиться с такими важными процессами, как переменный ток, радиоволны (электромагнитные волны) и т. д. Однако если вы перелистаете несколько страниц в начале учебника, то увидите, что курс физики для десятого класса опять начинается с механики — с рассмотрения механических колебаний. Лишь после этого продолжается не законченное в IX классе изучение электродинамики. Дело здесь вот в чем.

В восьмом классе наряду с общими законами механики много времени было уделено различным частным видам механического движения: движению с постоянным ускорением и движению по окружности. Но при этом ничего не было сказано о таких важнейших видах механического движения, как колебания и волны. Разумеется, о них не просто забыли рассказать в свое время. Имеются веские основания для того, чтобы колебания и

волны различной физической природы (механические и электромагнитные) рассматривать совместно.

Казалось бы, что общего между колебаниями маятника и разрядом конденсатора через катушку? Однако общее есть. Скоро вы узнаете, что и механические и электромагнитные колебания подчиняются совершенно одинаковым количественным законам. Это обнаруживается, если интересоваться не тем, что колеблется (груз на пружине или электрический ток в цепи), а тем, как совершаются колебания. Одинаковым законам подчиняются также волновые процессы различной природы.

В современной физике выделилась специальная дисциплина — физика колебаний. В ней колебания различной природы рассматриваются с единой точки зрения. Физика колебаний имеет очень большое практическое значение. Она занимается исследованием вибраций машин и механизмов; ее выводы лежат в основе электротехники переменных токов и радиотехники.

Глава I

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 1. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебательные движения, или колебания, чрезвычайно широко распространены в природе. Заставить предмет колебаться можно очень просто.

Подвесим пружину к штативу. К нижнему, свободному концу пружины прикрепим металлический шарик. Пружина растянется, и сила упругости $\vec{F}_0$ уравновесит силу тяжести $\vec{G}$, действующую на шарик (рис. 1, *а*). Если теперь вывести шарик из положения равновесия, слегка оттянув его вниз и отпустив, то он начнет совершать довольно интересное движение, вверх-вниз, вверх-вниз и т. д. (рис. 1, *б*). Такого рода движение, при котором тело поочередно смещается то в одну, то в другую сторону, и называется *колебанием*. С течением времени колебания затухают, и в конце концов шарик остановится.

Еще проще можно заставить шарик колебаться, если подвесить его на нити. В положении равновесия нить вертикальна и сила тяжести $\vec{G}$, действующая на шарик, уравновешивается силой упругости $\vec{F}_0$ нити (рис. 2, *а*). Если шарик отклонить и отпустить, то он начнет качаться направо-налево, направо-налево (рис. 2, *б*) до тех пор, пока колебания не затухнут. Шарик на нити — это про-

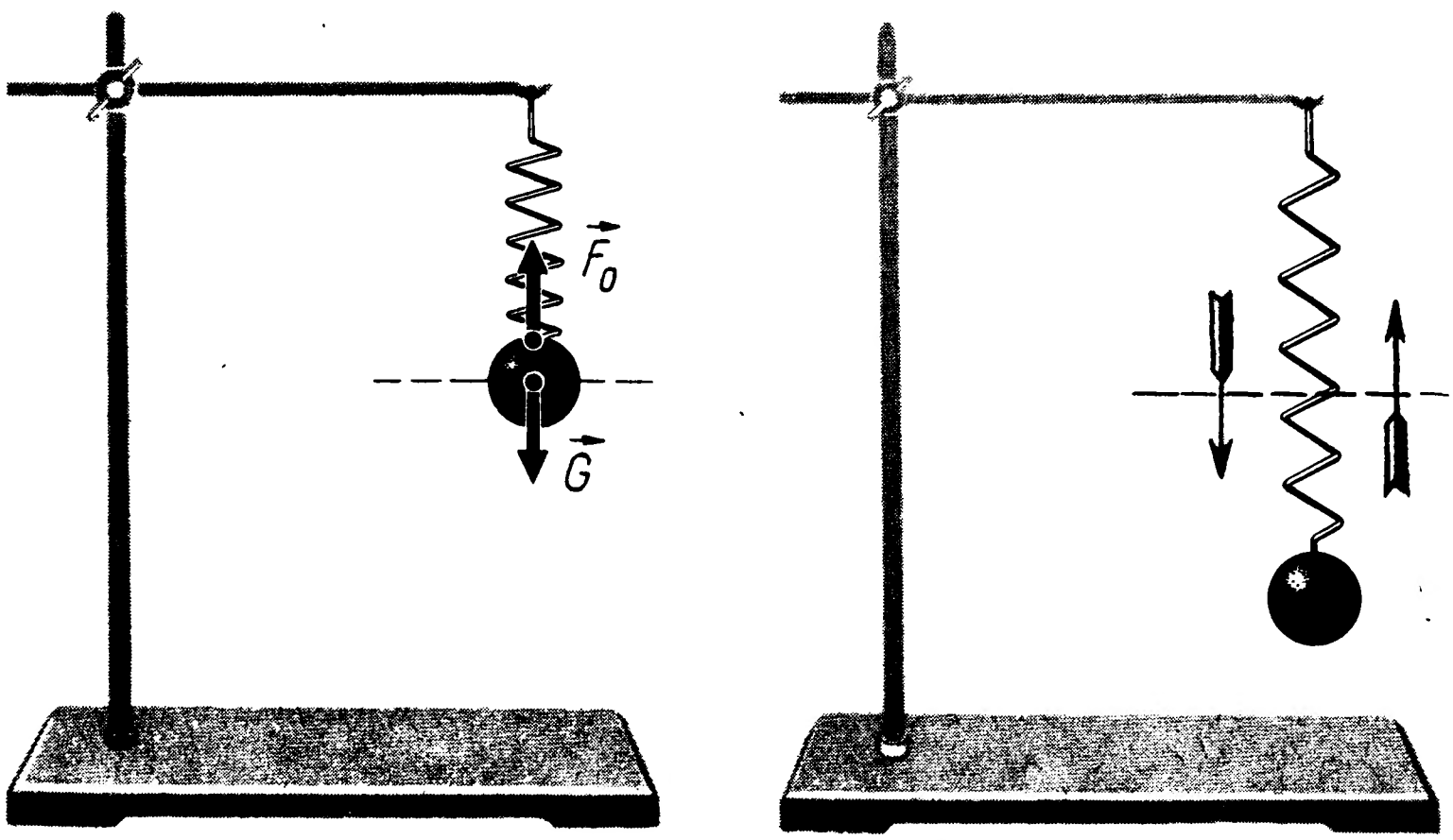


Рис. 1

а *б*

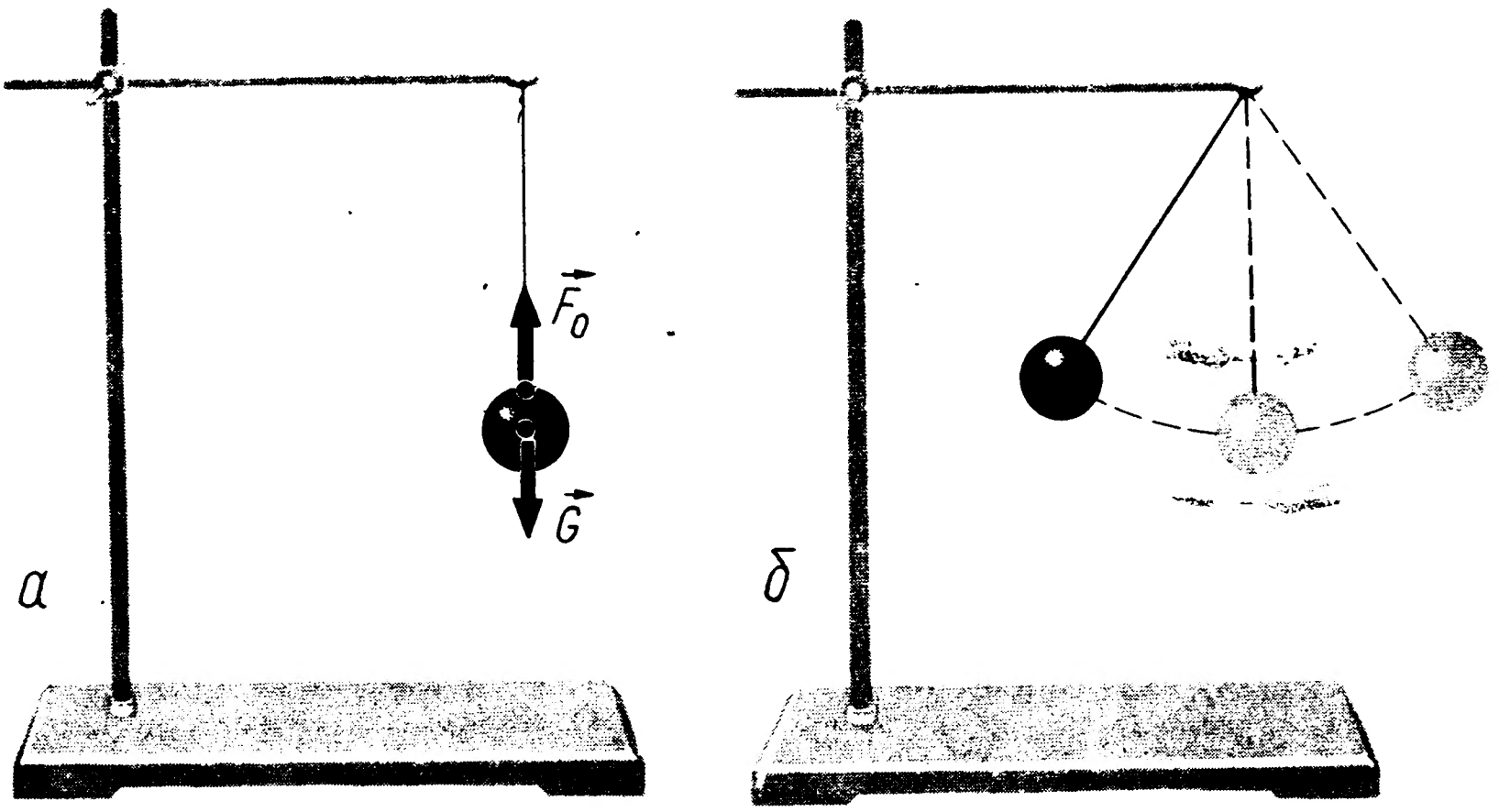


Рис. 2

стейший *маятник*[1]. Вообще же обычно **маятником называют подвешенное на нити или закрепленное на оси тело, которое может совершать колебания под действием силы тяжести.** При этом ось не должна проходить через центр тяжести тела. Маятником можно назвать линейку, повешенную на гвоздь, люстру, коромысло рычажных весов и т. д.

Что же является наиболее характерным признаком колебательного движения? Более всего бросается в глаза, что при колебаниях движения тела п о в т о р я ю т с я или почти повторяются. Так, маятник, совершив одно колебание, т. е. проделав путь от крайнего левого положения до крайнего правого и обратно, вновь совершает то же движение. Если движение повторяется точно, то его называют *периодическим.*

Колебания — это движения, которые точно или приблизительно повторяются через определенные интервалы времени.

Повторяются движения поршней в двигателе автомобиля, поплавка на волне, ветки дерева на ветру, нашего сердца. Все это различные примеры колебаний.

Свободные колебания. Группу тел, движения которых мы изучаем, называют в механике *системой тел* или просто *системой.* Силы, действующие между телами системы, называются *внутренними. Внешними силами* называют силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее.

Самым простым видом колебаний являются колебания, возникающие в системе под действием внутренних сил после того, как система была выведена из положения равновесия. Такие колеба-

---

[1] Нужно иметь в виду, что шарик на нити будет представлять собой маятник лишь в том случае, если на него действует сила тяжести. Создающий эту силу земной шар входит в колебательную систему, которую мы для краткости называем просто маятником.

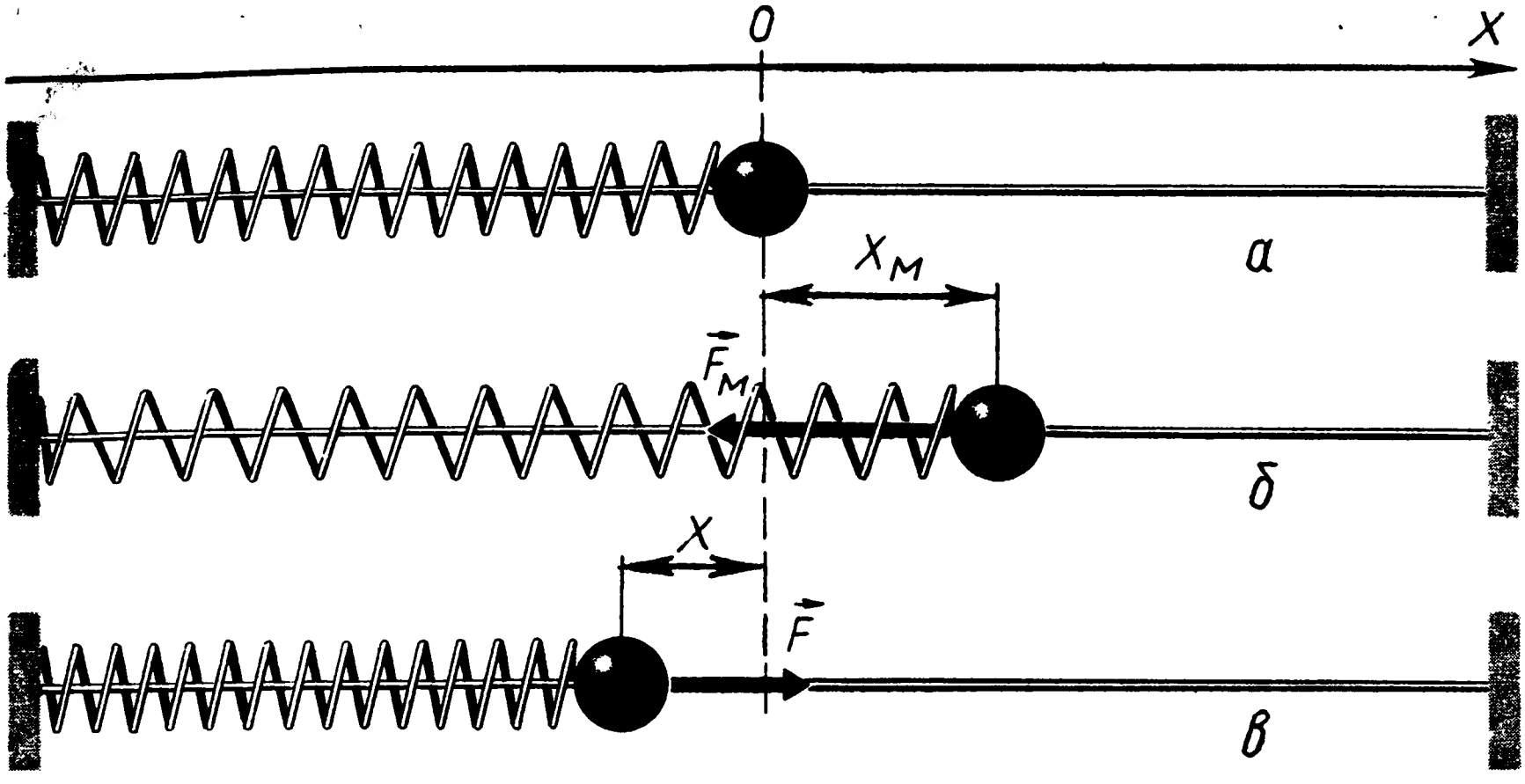


Рис. 3

ния называют *свободными*. Колебания груза на пружине или груза, подвешенного на нити,— это примеры свободных колебаний. После выведения этих систем из положения равновесия возникают условия, при которых тела колеблются без воздействия внешних периодически меняющихся сил.

Вынужденные колебания. Если мы начнем двигать рукой вперед и назад книгу на столе, то она будет совершать колебания, но эти колебания не будут свободными. Колебания книги в данном случае вызваны воздействием со стороны руки, периодически меняющимся по величине и направлению.

Колебания, совершаемые телами под действием периодически изменяющихся сил, называются *вынужденными*.

Вынужденными, в частности, являются колебания поршней в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания, иглы швейной машины и т. д.

§ 2. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Выясним, какими свойствами должна обладать система, для того чтобы в ней могли возникнуть свободные колебания. Удобнее всего рассмотреть вначале колебания шарика на стержне вдоль горизонтали под действием силы упругости пружины (рис. 3)[1].

Если сместить шарик из положения равновесия (рис. 3, *а*) вправо, то длина пружины увеличится на $x_м$ (рис. 3, *б*) и на шарик начнет действовать сила упругости $\vec{F}$ со стороны пружины. Эта сила согласно закону Гука пропорциональна деформации пружи-

[1] Анализ колебаний шарика, подвешенного на вертикальной пружине, несколько сложнее, так как в этом случае действуют одновременно переменная сила упругости пружины и постоянная сила тяжести. Но, впрочем, характер колебаний в том другом случае совершенно одинаков.

ны и направлена влево. Под действием силы $\vec{F}$ шарик начнет двигаться с ускорением влево, увеличивая скорость. Сила F при этом будет убывать, так как деформация пружины уменьшается. В момент, когда шарик достигнет положения равновесия, сила упругости пружины станет равной нулю. Следовательно, согласно второму закону Ньютона станет равным нулю и ускорение шарика.

Но к этому моменту скорость шарика уже достигнет некоторого значения. Поэтому, не останавливаясь в положении равновесия, он будет вследствие инертности продолжать двигаться влево. Пружина при этом укорачивается; в результате появляется сила упругости, направленная уже вправо и тормозящая движение шарика (рис. 3, *в*). Эта сила, а значит, и направленное вправо ускорение увеличиваются по модулю прямо пропорционально модулю смещения x шарика относительно положения равновесия. Скорость же уменьшается до тех пор, пока в крайнем левом положении не обратится в нуль. После этого шарик начнет ускоренно двигаться вправо. С уменьшением модуля смещения x сила $\vec{F}$ убывает по модулю и в положении равновесия опять обращается в нуль. Но шарик уже успевает к этому моменту приобрести скорость и, следовательно, продолжает двигаться вправо. Это движение приводит к растяжению пружины и к появлению силы, направленной влево. Движение шарика тормозится до полной остановки в крайнем правом положении, после чего весь процесс повторяется сначала.

Если бы не существовало трения, то движение шарика не прекратилось бы никогда. Однако трение (в частности, сопротивление воздуха) есть, причем направление силы сопротивления как при движении шарика вправо, так и при его движении влево все время противоположно направлению скорости. Поэтому трение тормозит движение шарика, и размах его колебаний постепенно уменьшается до тех пор, пока движение не прекратится. При малом трении затухание становится заметным лишь после того, как шарик совершит много колебаний. И если интересоваться движением шарика на протяжении не очень большого интервала времени, то затуханием его колебаний можно пренебречь. В этом случае влияние силы сопротивления на движение можно не учитывать.

Для уменьшения трения при колебаниях шарика вдоль горизонтали используют установку, изображенную на рисунке 4. Ша-

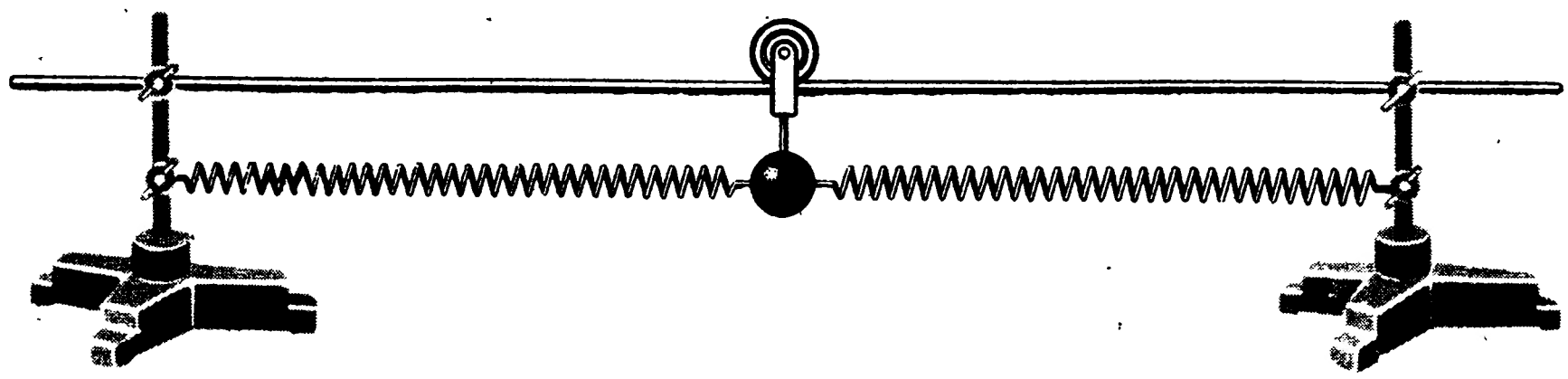


Рис. 4

рик с помощью стерженька прикреплен к обойме блока, который может кататься с малым трением вдоль горизонтального направляющего стержня Сила тяжести, действующая на шарик, в любой момент времени компенсируется силой упругости стерженька. Колебания шарика происходят под действием сил упругости двух пружин.

Если сила сопротивления велика, то пренебречь ее действием даже в течение малых интервалов времени нельзя. Опустите шарик на пружине в стакан с вязкой жидкостью, например с глицерином (рис. 5). Если пружина достаточно мягкая, то выведенный из положения равновесия шарик совсем не будет колебаться. Под действием силы упругости он просто вернется в положение равновесия (пунктирная линия на рисунке 5); за счет действия силы сопротивления скорость его в положении равновесия будет практически равна нулю.

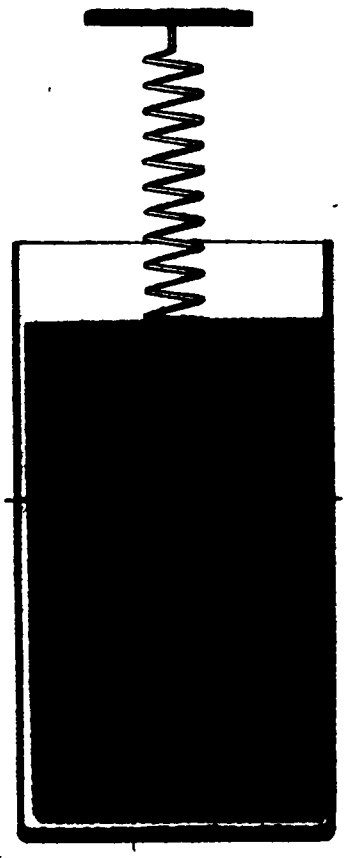


Рис. 5

Теперь можно сообразить, что́ является существенным для того, чтобы в системе могли возникнуть свободные колебания. Должны выполняться два условия. В о - п е р в ы х, при выведении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, направленная к положению равновесия и, следовательно, стремящаяся возвратить тело в положение равновесия. Именно так действует в рассмотренной нами системе пружина: и при перемещении шарика влево, и при его перемещении вправо сила упругости направлена к положению равновесия. В о - в т о р ы х, трение в системе должно быть достаточно мало. Иначе колебания быстро затухнут или даже не возникнут. Незатухающие колебания возможны лишь при отсутствии трения.

Оба условия являются совершенно общими, справедливыми для любой системы, в которой могут возникнуть свободные колебания. Проверим это на другой простой системе — маятнике.

§ 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК

Рассмотрим простой маятник — тяжелый шарик, подвешенный на длинной нити. Если размеры шарика много меньше длины нити, то этими размерами можно пренебречь и рассматривать шарик как материальную точку. Растяжением нити также можно пренебречь, так как оно очень мало. Можно пренебречь и массой нити по сравнению с массой шарика. Таким образом, вместо реального маятника — шарика определенного размера на нити, которая, конечно, немного деформируется при движении и имеет массу, мы вправе рассматривать простую модель: материальную точку, подвешенную на нерастяжимой невесомой нити. Такая модель маятника называется *математическим маятником*. Маленький шарик

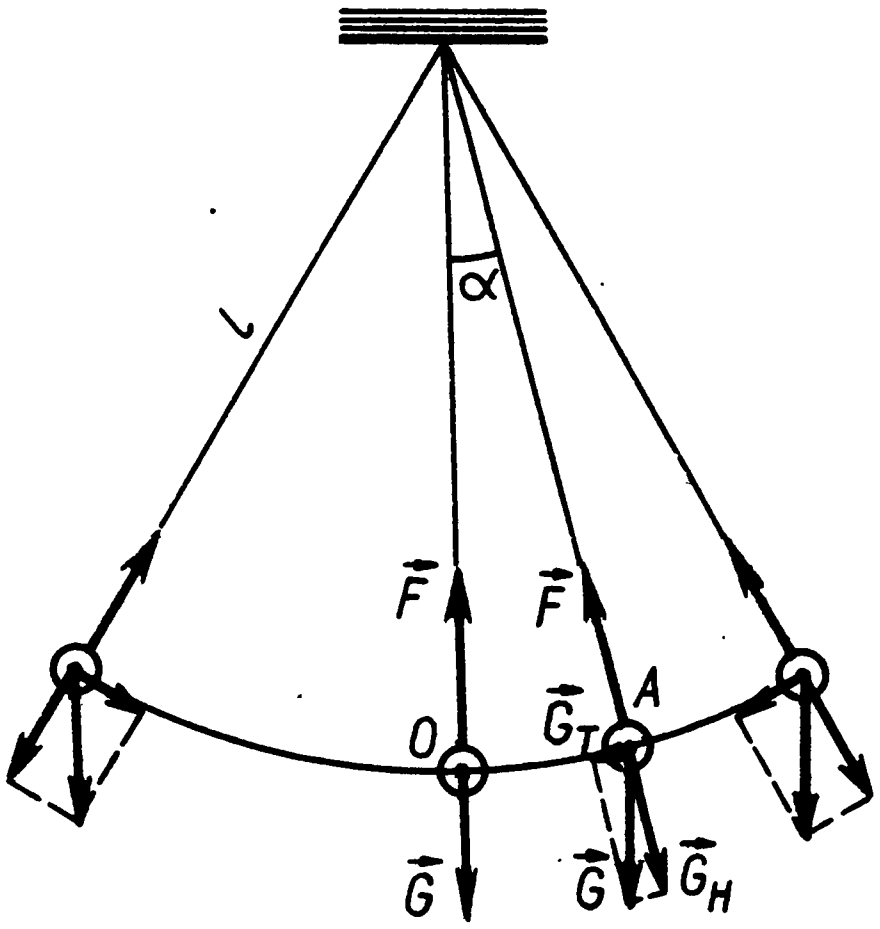


Рис. 6

на длинной тонкой нити должен вести себя практически так же, как и математический маятник. Выведем маятник из положения равновесия и отпустим. На шарик будут действовать две силы: сила тяжести $\vec{G}=m\vec{g}$, направленная вертикально вниз, и сила упругости нити $\vec{F}$, направленная вдоль нити (рис. 6). Конечно, при движении маятника на него еще действует сила сопротивления. Но мы будем считать ее пренебрежимо малой.

Для того чтобы отчетливо представить себе динамику движения маятника, удобно силу тяжести разложить на две составляющие: нормальную $\vec{G}_н$, направленную вдоль нити, и тангенциальную $\vec{G}_т$, направленную перпендикулярно нити по касательной к траектории шарика. Сила упругости нити $\vec{F}$ и составляющая $\vec{G}_н$ силы тяжести перпендикулярны скорости маятника и сообщают ему так называемое *нормальное* или *центростремительное ускорение,* направленное к центру дуги окружности — траектории маятника. Работа этих сил равна нулю, и поэтому согласно теореме о кинетической энергии они не меняют скорости маятника по модулю. Их действие приводит лишь к тому, что вектор скорости непрерывно меняет направление, так что в любой момент времени скорость направлена по касательной к дуге окружности.

Тангенциальная составляющая $\vec{G}_т$ силы тяжести создает так называемое *тангенциальное ускорение,* характеризующее изменение модуля скорости. Полное ускорение маятника равно геометрической сумме тангенциального и нормального ускорений. Под действием составляющей $\vec{G}_т$ маятник начинает двигаться по дуге окружности вниз с нарастающей скоростью. По мере движения маятника тангенциальная составляющая силы тяжести, направленная к положению равновесия, уменьшается и в момент, когда маятник проходит через положение равновесия, она становится равной нулю. Вследствие своей инертности маятник движется дальше, поднимаясь вверх. При этом составляющая $\vec{G}_т$ уже будет направлена против скорости. Поэтому скорость маятника уменьшается, и тем быстрее, чем больше угол между нитью и вертикалью. Ведь с увеличением угла эта составляющая силы тяжести растет. В момент остановки маятника в верхней точке его

тангенциальное ускорение максимально и направлено в сторону положения равновесия. Далее скорость маятника увеличивается, и он снова движется к положению равновесия. Пройдя его, он возвращается в исходное положение, если только сила сопротивления мала и ее работой в течение небольшого интервала времени можно пренебречь. Опустив маятник в сосуд с вязкой жидкостью, мы тут же обнаружим, что колебания не происходят совсем или затухают очень быстро.

1. Какие колебания называют свободными? Приведите примеры свободных колебаний, не упомянутые в тексте.
2. Какие колебания называют вынужденными? Приведите примеры вынужденных колебаний.
3. При каких условиях в системе возникают свободные колебания?

§ 4. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ УПРУГОСТИ

Для того чтобы описать количественно процесс колебаний тела под действием силы упругости пружины или колебания шарика, подвешенного на нити, нужно воспользоваться законами механики Ньютона.

Согласно второму закону Ньютона произведение массы тела m на ускорение $\vec{a}$ равно равнодействующей $\vec{F}$ всех сил, приложенных к телу:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \qquad (1.1)$$

Запишем уравнение движения для шарика, движущегося прямолинейно вдоль горизонтали под действием пружины (см. рис. 3). Направим ось OX вправо. Пусть начало отсчета координат соответствует положению равновесия (см. рис. 3, *а*).

Движение вдоль оси OX определяется проекцией F_x на это направление силы упругости $\vec{F}$ пружины. Эта проекция прямо пропорциональна смещению шарика из положения равновесия. Смещение равно координате x шарика, причем проекция силы и координата имеют противоположные знаки (см. рис. 3, *б* и *в*). Следовательно,

$$F_x = -kx, \qquad (1.2)$$

где k — жесткость пружины.

Уравнение движения шарика запишется так:

$$ma_x = -kx, \qquad (1.3)$$

где a_x — проекция ускорения на направление оси OX. Разделив левую и правую части уравнения (1.3) на m, получим:

$$a_x = -\frac{k}{m}x. \qquad (1.4)$$

Так как масса m и жесткость k являются постоянными величинами, то их отношение $\frac{k}{m}$ также является постоянной величиной. Мы получили уравнение колебаний тела под действием силы упругости. Оно очень просто: **проекция a_x ускорения тела прямо пропорциональна его координате x, взятой с противоположным знаком.**

Самым замечательным является то, что такие же уравнения описывают свободные колебания в самых различных системах.

§ 5. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

При колебаниях шарика на нерастяжимой нити он все время движется по дуге окружности, радиус которой равен длине нити l. Поэтому положение шарика в любой момент времени определяется одной величиной — углом α отклонения нити от вертикали. Будем считать угол α положительным, если маятник отклонен направо от положения равновесия, и отрицательным, если налево (см. рис. 6). Модуль скорости маятника непрерывно изменяется под действием тангенциальной составляющей $\vec{G}_т$ силы тяжести. Быстрота изменения модуля скорости маятника определяется тангенциальным ускорением. Об этом было сказано в § 3.

Проекция силы тяжести на касательную к траектории шарика в момент, когда нить маятника отклонена от положения равновесия на угол α, выражается так:

$$G_т = -G \sin \alpha = -mg \sin \alpha. \qquad (1.5)$$

Здесь знак «—» стоит потому, что $G_т$ и α имеют противоположные знаки. Согласно второму закону Ньютона

$$ma_т = G_т,$$

или

$$ma_т = -mg \sin \alpha, \qquad (1.6)$$

где $a_т$ — проекция ускорения на касательную к траектории.

Разделив левую и правую части этого уравнения на m, получим:

$$a_т = -g \sin \alpha. \qquad (1.7)$$

До сих пор предполагалось, что углы отклонения нити маятника от вертикали могут быть любыми. В дальнейшем будем считать их малыми. При малых углах, если измерять угол в радианах,

$$\sin \alpha \approx \alpha.$$

Следовательно, можно принять

$$a_т = -g\alpha. \qquad (1.8)$$

Смещение шарика от положения равновесия можно характеризовать не только углом, но и величиной s, измеряемой длиной дуги OA (см. рис. 6), взятой со знаком «+», если шарик смещается от положения равновесия O вправо, и со знаком «—», если он смещается влево. Очевидно, что

$$s = \alpha l. \tag{1.9}$$

Подставив вместо α выражение $\frac{s}{l}$, получим:

$$a_\tau = -\frac{g}{l}s. \tag{1.10}$$

Это уравнение совпадает с уравнением движения шарика на пружине (1.4). Здесь только вместо проекции ускорения a_x стоит проекция ускорения a_τ и вместо координаты x — величина s. Да и коэффициент пропорциональности зависит уже не от жесткости пружины и массы шарика, а от ускорения свободного падения и длины нити. Но по-прежнему ускорение (теперь тангенциальное) прямо пропорционально смещению (определяемому дугой) шарика от положения равновесия.

Мы пришли к замечательному выводу: **уравнения движения, описывающие колебания таких различных систем, как шарик на пружине и маятник, одинаковы.** Это означает, что движение шарика и колебания маятника происходят одинаковым образом, т. е. смещения шарика на пружине и шарика маятника от положений равновесия изменяются со временем по одному и тому же закону, несмотря на то, что силы, вызывающие колебания, имеют различную физическую природу. В первом случае это сила упругости пружины, а во втором — составляющая силы тяжести.

Уравнение движения (1.4), как и уравнение (1.10), выглядит внешне очень просто: **ускорение прямо пропорционально координате.** Но решить его, т. е. определить, как меняется положение колеблющегося тела в пространстве с течением времени, далеко не просто. В восьмом классе мы рассматривали движение с постоянным ускорением. При колебаниях же ускорение меняется со временем, так как меняется сила, действующая на тело.

§ 6. ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Зная, как связаны между собой ускорение и координата колеблющегося тела, можно на основе математического анализа найти зависимость координаты от времени.

Ускорение — вторая производная координаты по времени. Мгновенная скорость, как вам известно из курса математики IX класса, представляет собой производную координаты по времени. Ускорение — это производная скорости по времени, или вторая

производная координаты по времени [1]. Поэтому уравнение (1.4), описывающее колебания груза на пружине, можно записать так:

$$x'' = -\frac{k}{m}x, \qquad (1.11)$$

где x'' — вторая производная координаты по времени. Согласно уравнению (1.11) при свободных колебаниях координата x изменяется со временем так, что вторая производная координаты по времени прямо пропорциональна самой координате и противоположна ей по знаку.

Гармонические колебания. Из курса математики X класса известно, что функции синус и косинус обладают тем свойством, что вторая производная функции пропорциональна самой функции, взятой с противоположным знаком. Можно доказать, что никакие другие функции этим свойством не обладают. Значит, **координата тела, совершающего свободные колебания, меняется с течением времени по закону синуса или косинуса.**

Так как при колебаниях движения тела периодически повторяются, то не удивительно, что изменение со временем координаты тела, совершающего свободные колебания, выражается через синус или косинус, которые являются периодическими функциями.

Периодические изменения физической величины в зависимости от времени, происходящие по закону синуса или косинуса, называются гармоническими колебаниями.

Вначале мы будем рассматривать гармонические изменения координаты. В дальнейшем познакомимся с гармоническими изменениями других величин.

Амплитуда колебаний. Важной характеристикой колебательного движения является амплитуда.

Амплитудой гармонических колебаний называется модуль наибольшего смещения тела от положения равновесия.

Амплитуда может иметь различные значения в зависимости от того, насколько мы смещаем тело от положения равновесия в начальный момент времени, и от того, какая скорость сообщается при этом телу. Амплитуда определяется начальными условиями.

Максимальные по модулю значения синуса и косинуса равны единице. Поэтому решение уравнения (1.11) должно иметь вид произведения амплитуды $x_м$ на синус или косинус, которые должны быть функциями времени.

Решение уравнения движения, описывающего свободные колебания. Какую же форму имеет решение уравнения (1.11)? Нельзя просто считать, что $x = x_м \cos t$ или $x = x_м \sin t$, так как в этом случае $x'' = -x_м \cos t = -x$. Небольшое усложнение формы решения сразу приведет нас к цели. Положим,

$$x = x_м \cos \omega_0 t, \qquad (1.12)$$

---

[1] Для краткости мы говорим об ускорении и скорости. В действительности имеются в виду проекции этих векторных величин.

где ω_0—некоторая постоянная величина, не зависящая от времени.

Теперь первая производная —

$$x' = -\omega_0 x_м \sin \omega_0 t,$$

а вторая производная —

$$x'' = -\omega_0^2 x_м \cos \omega_0 t = -\omega_0^2 x. \qquad (1.13)$$

Это уравнение в точности совпадает с уравнением движения (1.11), если положить

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \text{ или } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \qquad (1.14)$$

Следовательно, функция

$$x = x_м \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

есть решение исходного уравнения (1.11) движения груза на пружине. Конечно, и функция

$$x = x_м \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

также будет решением этого уравнения.

Период и частота гармонических колебаний. Выясним теперь физический смысл величины ω_0.

При колебаниях движения тела периодически повторяются. **Минимальный промежуток времени T, через который движение тела полностью повторяется, называют периодом колебаний.**

Зная период, можно определить *частоту колебаний,* т. е. число колебаний в единицу времени, например в секунду. Если одно колебание совершается за время T, то число колебаний за секунду ν определяется так:

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (1.15)$$

В системах единиц СГС и СИ частота колебания равна единице, если в секунду совершается одно колебание. Единица измерения частоты называется г е р ц е м (сокращенно — Гц) в честь немецкого физика Генриха Г е р ц а.

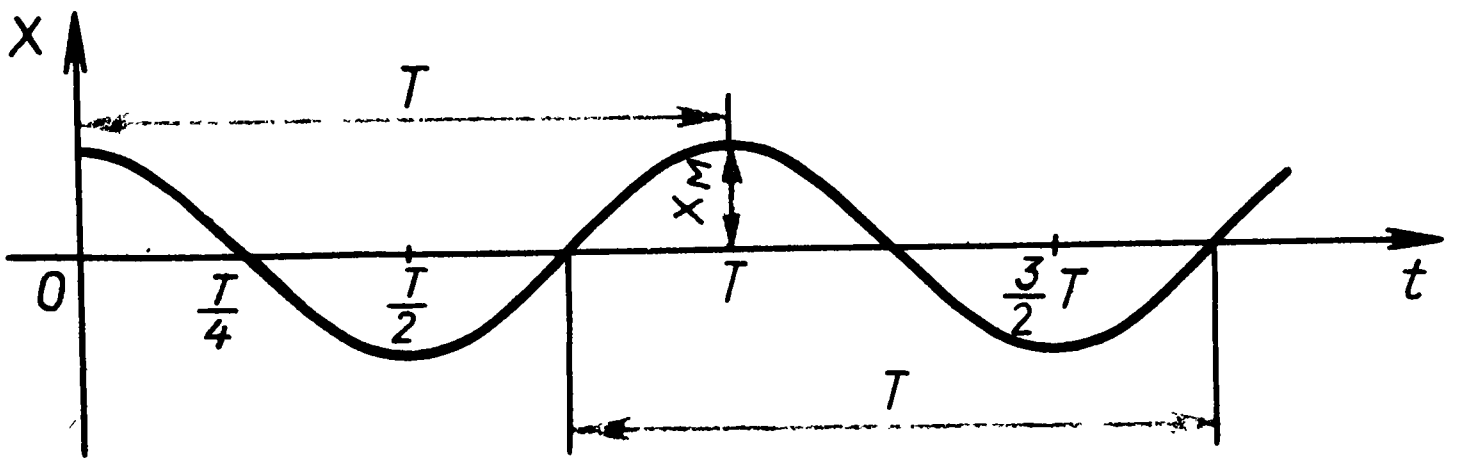


Рис. 7

Через промежуток времени, равный периоду T, т. е. при увеличении аргумента косинуса на $\omega_0 T$, движение повторяется и косинус принимает прежнее значение. Но из математики известно, что наименьший период косинуса равен 2π. Следовательно,

$$\omega_0 T = 2\pi,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \qquad (1.16)$$

Таким образом, величина ω_0 — это число колебаний тела, но не за секунду, а за 2π секунд. Она называется *циклической* или *круговой частотой* [1].

Частоту свободных колебаний называют *собственной частотой колебательной системы.*

График изменения координаты со временем при гармонических колебаниях. Если в начальный момент времени ($t=0$) сместить тело от положения равновесия на расстояние $x_м$ и отпустить, то в дальнейшем координата тела будет меняться по закону

$$x = x_м \cos \omega_0 t.$$

График зависимости координаты тела от времени представляет собой косинусоиду, изображенную на рисунке 7. Через промежутки времени T движение тела в точности повторяется. Подобный график можно заставить вычертить само колеблющееся тело, например маятник. На рисунке 8 изображен маятник с песочницей. На равномерно движущемся под ним листе картона он струйкой песка вычерчивает график зависимости координаты от времени. Это простой метод «временно́й развертки» колебаний, дающий

[1] Часто в дальнейшем для краткости мы будем называть циклическую частоту просто частотой. Отличить циклическую частоту ω от частоты ν можно по обозначениям.

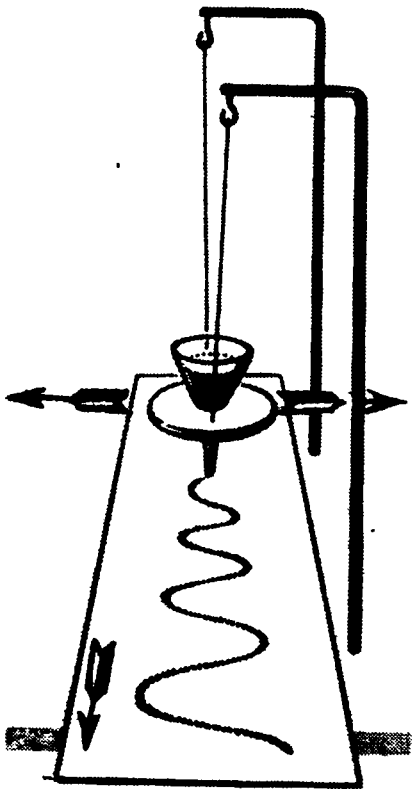


Рис. 8

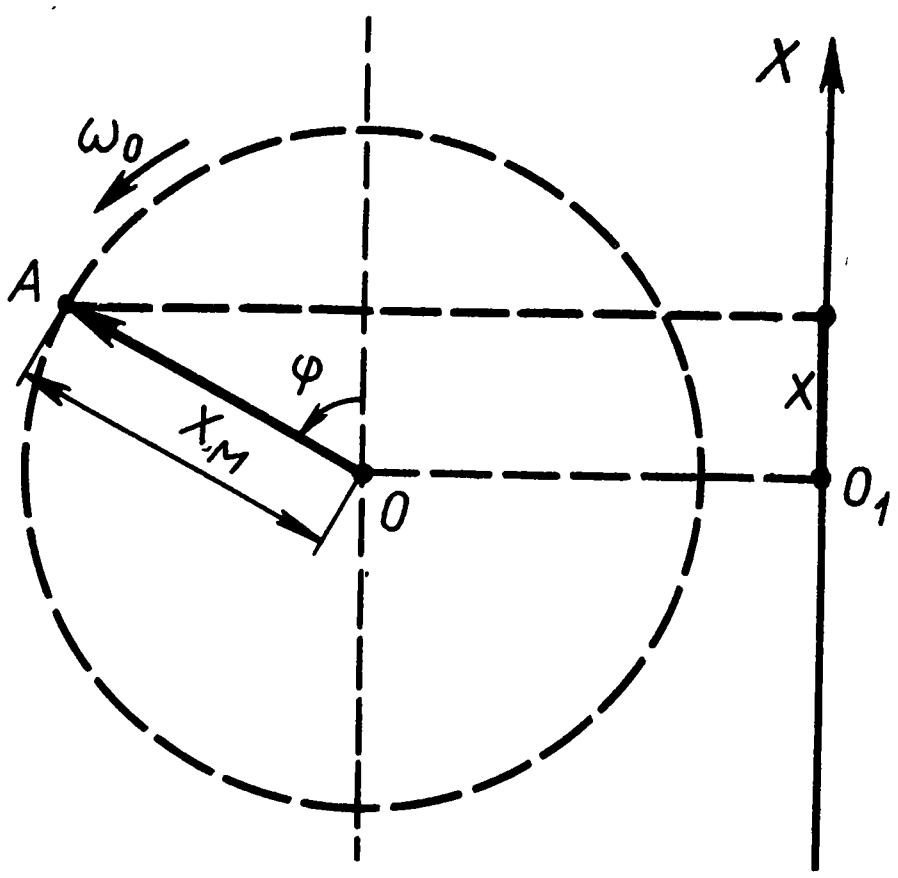


Рис. 9

весьма полное представление о процессе колебательного движения. Чем быстрее движется лист картона, тем, очевидно, бóльшим оказывается расстояние между соседними максимумами смещения. Если силы сопротивления малы, то затухание колебаний на протяжении нескольких периодов остается незамеченным.

§ 7. СВЯЗЬ МЕЖДУ ГАРМОНИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ И ДВИЖЕНИЕМ ПО ОКРУЖНОСТИ

Выясним, по какому закону изменяется проекция на ось O_1X радиус-вектора $\overrightarrow{OA}$, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω_0 (рис. 9). Пусть в начальный момент времени ($t=0$) этот вектор параллелен оси O_1X. Тогда в начальный момент времени проекция вектора $\overrightarrow{OA}$ равна его модулю $|\overrightarrow{OA}| = x_м$.

При вращении вектора $\overrightarrow{OA}$ с постоянной угловой скоростью угол φ между вектором и осью O_1X растет прямо пропорционально времени:

$$\varphi = \omega_0 t.$$

Проекция x вращающегося радиус-вектора на ось O_1X будет меняться по закону

$$x = x_м \cos\varphi = x_м \cos\omega_0 t.$$

Следовательно, эта проекция меняется гармонически.

Гармонически будет меняться и координата тени шарика, закрепленного на диске, который вращается с постоянной угловой скоростью. Направим на шарик пучок световых лучей, параллельных плоскости диска, и расположим за ним экран перпендикулярно к световым лучам (рис. 10). Тогда проекция на вертикальную

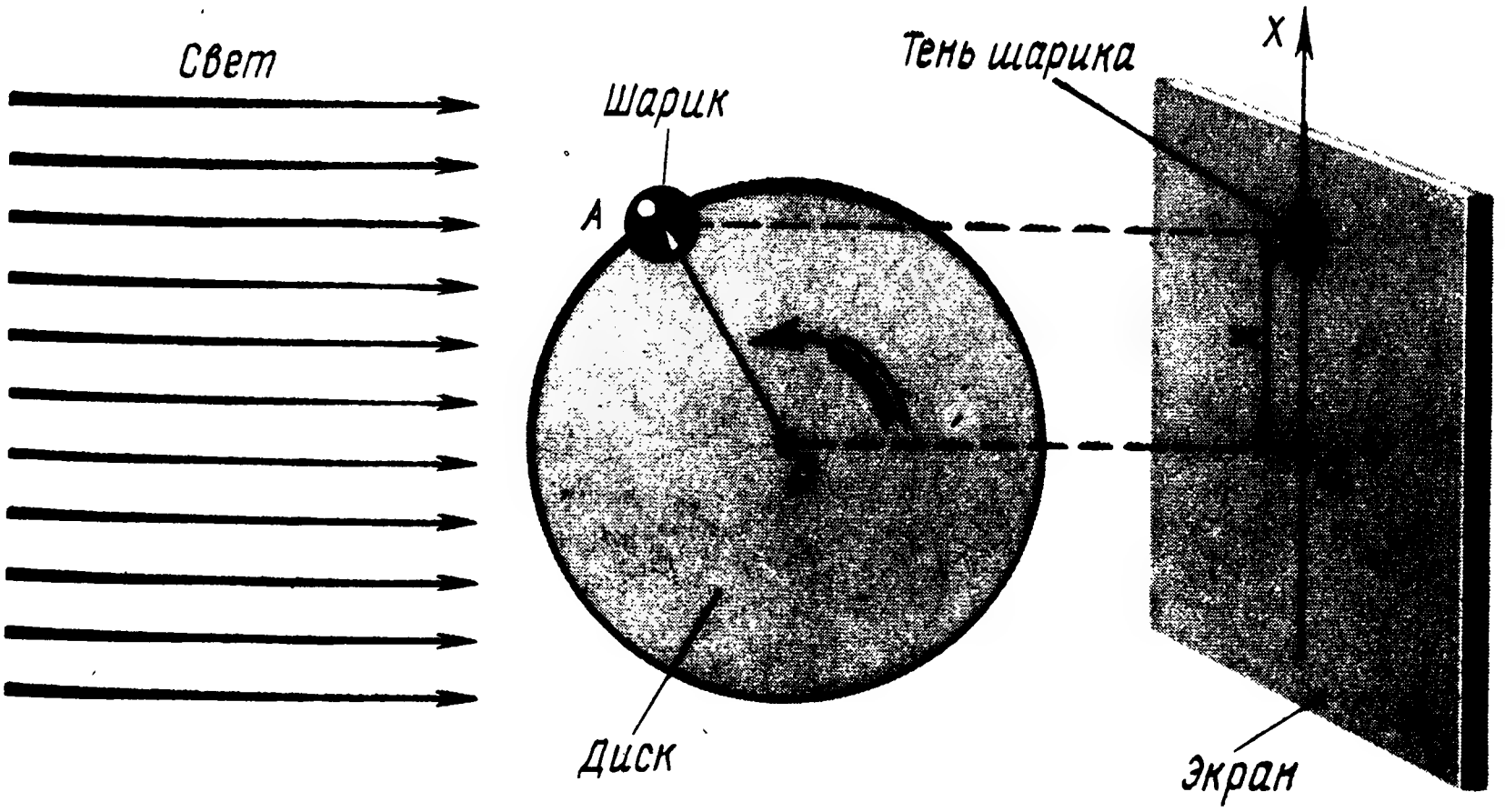


Рис. 10

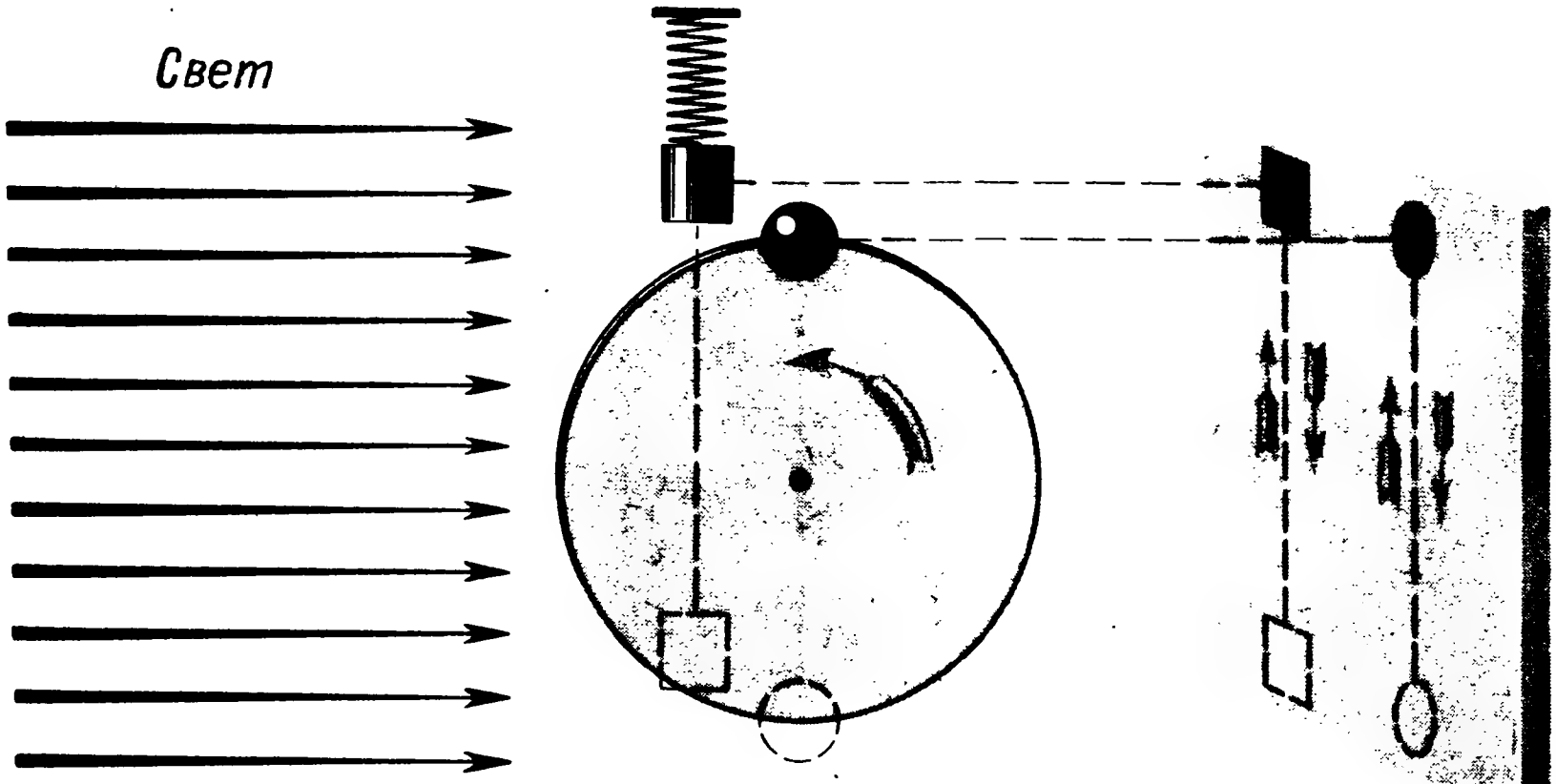


Рис. 11

ось радиус-вектора $\overrightarrow{OA}$, проведенного от центра диска к шарику, будет совпадать с координатой тени шарика, если эту координату отсчитывать от точки O_1 — проекции центра диска. Проекция же вращающегося вектора меняется гармонически. Следовательно, и координата тени шарика будет меняться гармонически.

Подвесим груз на пружине. Точку подвеса расположим так, чтобы тень груза находилась на одном уровне с тенью оси диска. Сместим далее груз из положения равновесия вверх на расстояние $x_м$, равное радиусу окружности, по которой движется шарик, и отпустим. Груз и его тень начнут совершать колебания. Можно подобрать скорость вращения диска так, чтобы движения теней шарика и груза полностью совпадали (рис. 11). Следовательно, **колебания груза на пружине и колебания тени шарика, движущегося по окружности с постоянной скоростью, происходят по одному и тому же закону!** Этот опыт служит одним из экспериментальных доказательств того, что груз на пружине совершает гармонические колебания.

§ 8. ФАЗА КОЛЕБАНИЙ

Мы познакомились с основными величинами, характеризующими гармонические колебания: амплитудой колебаний $x_м$, периодом T, частотой колебаний ν и циклической частотой ω_0. Остается познакомиться с еще одной важной величиной — *фазой*.

При заданной амплитуде гармонических колебаний координата колеблющегося тела в любой момент времени однозначно определяется аргументом косинуса (или синуса) $\varphi = \omega_0 t$.

Величину, стоящую под знаком косинуса или синуса, называют фазой колебаний, описываемых этими функциями.

Фаза определяет значение не только координаты, но и других физических величин, например скорости и ускорения, изменяю-

щихся также по гармоническому закону Поэтому можно сказать, **что фаза определяет при заданной амплитуде состояние колебательной системы в любой момент времени.**

Так как $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, то

$$\varphi = \omega_0 t = 2\pi \frac{t}{T}. \qquad (1.17)$$

Отношение $\frac{t}{T}$ указывает, какая часть периода прошла от момента начала колебаний. *Любому значению времени, выраженному в долях периода, соответствует значение фазы, выраженной в радианах.* Так, по прошествии времени $t=T/4$ (четверти периода) $\varphi=\pi/2$, по прошествии половины периода $\varphi=\pi$, по прошествии целого периода $\varphi=2\pi$ и т. д.

Можно изобразить на графике зависимость координаты колеблющейся точки не от времени, а от фазы. На рисунке 12 показана та же косинусоида, что и на рисунке 7, но на горизонтальной оси отложены вместо времени различные значения фазы φ.

Запись гармонических колебаний с помощью косинуса и синуса. Вы уже знаете, что при гармонических колебаниях координата тела изменяется со временем по закону косинуса или синуса. После введения понятия фазы следует остановиться на этом подробнее.

Синус отличается от косинуса только сдвигом аргумента на четверть периода, т. е. на $\pi/2$:

$$\cos\varphi = \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (1.18)$$

Поэтому вместо формулы $x=x_м \cos\omega_0 t$ можно для описания гармонических колебаний использовать формулу

$$x = x_м \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (1.19)$$

Но при этом *начальная фаза,* т. е. значение фазы в момент $t=0$, равна не нулю, а $\pi/2$. Обычно колебания тела на пружине (или маятника) мы возбуждаем, выводя тело из положения равновесия и отпуская его. Смещение от положения равновесия максимально в начальный момент, и для описания колебаний удобнее пользоваться формулой (1.12) с применением косинуса, чем формулой (1.19) с применением синуса.

Другое дело, если бы мы возбудили колебания покоящегося тела кратковременным толчком. Тогда координата в начальный момент равнялась бы нулю, и удобнее было бы пользоваться формулой с применением синуса:

$$x = x_м \sin\omega_0 t, \qquad (1.20)$$

так как при этом начальная фаза равна нулю.

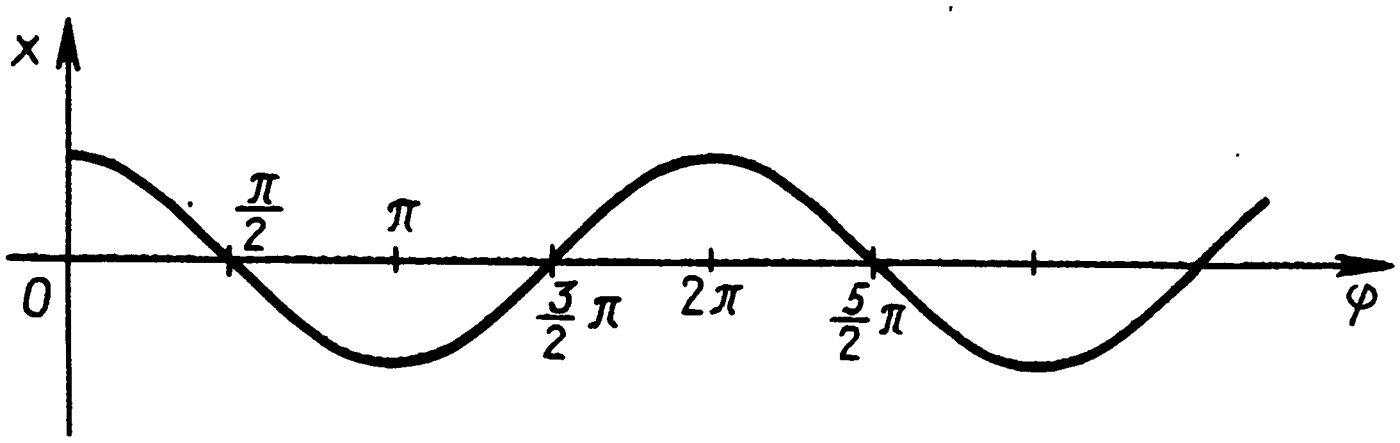


Рис. 12

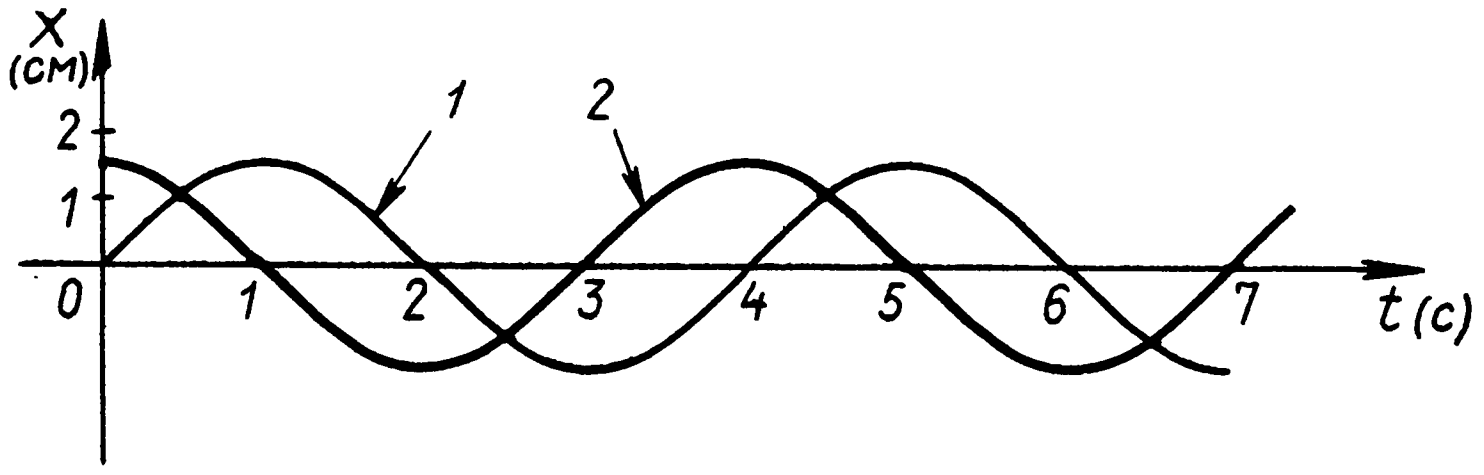


Рис. 13

Сдвиг фаз. Колебания, описываемые формулами (1.19) и (1.20), отличаются друг от друга только фазами. *Разность фаз,* или, как часто говорят, *сдвиг фаз,* этих колебаний составляет $\pi/2$. На рисунке 13 показаны графики зависимости координат от времени для двух гармонических колебаний, сдвинутых по фазе $\pi/2$. График *1* соответствует колебаниям, совершающимся по синусоидальному закону $x = x_м \sin \omega_0 t$, а график *2* — колебаниям, совершающимся по косинусоидальному закону $x = x_м \cos \omega t = x_м \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$. Такие колебания, в частности, будут совершать тени двух шариков, закрепленных на вращающемся диске, если угол между радиус-векторами, проведенными к шарикам, равен $\pi/2$.

Для определения разности фаз двух колебаний оба эти колебания надо выразить через одну и ту же тригонометрическую функцию (или косинус, или синус).

?

1. Какие колебания называют гармоническими?
2. Как связаны ускорение и координата при гармонических колебаниях?
3. Как связана циклическая частота колебаний с периодом?

Рис. 14

4. Координата тела, измеренная в сантиметрах, изменяется с течением времени следующим образом: $x = 3{,}5 \cos 4\pi t$. Чему равны амплитуда колебаний и циклическая частота? Чему равна фаза колебаний спустя пять секунд после начала колебаний?
5. Каковы амплитуды и периоды гармонических колебаний, графики которых представлены на рисунках 13 и 14?

§ 9. СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

При гармонических колебаниях координаты тела его скорость и ускорение также меняются гармонически. Проекция скорости на ось OX есть производная координаты x по времени. Если $x = x_м \cos \omega_0 t$, то

$$v_x = x' = -\omega_0 x_м \sin \omega_0 t = \omega_0 x_м \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (1.21)$$

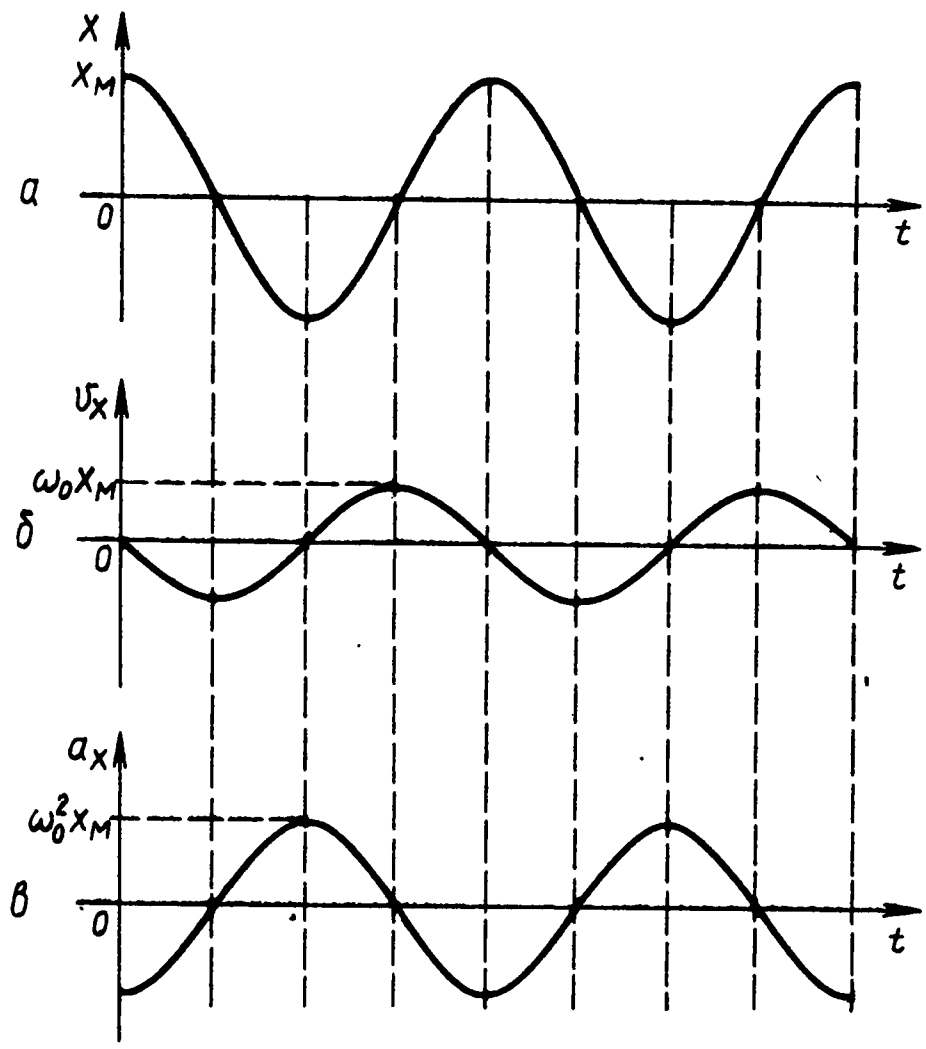


Рис. 15

Скорость при гармонических колебаниях меняется с течением времени гармонически, но фаза скорости сдвинута относительно фазы координаты на $\pi/2$.

В момент, когда координата равна нулю, модуль скорости максимален, и, наоборот, скорость равна нулю, когда координата максимальна по модулю (рис. 15, *а, б*). Амплитуда $v_м$ колебаний скорости, т. е. максимальное по модулю значение скорости, выражается через амплитуду смещения так:

$$v_м = \omega_0 x_м.$$

Проекция ускорения на ось OX есть производная проекции скорости (см. формулу 1.21) по времени:

$$a_x = v_x' = -\omega_0^2 x_м \cos \omega_0 t,$$

или

$$a_x = \omega_0^2 x_м \cos(\omega_0 t + \pi). \quad (1.22)$$

Ускорение при гармонических колебаниях меняется гармонически. Амплитуда ускорения равна $a_м = \omega_0^2 x_м$, а по фазе колебания ускорения сдвинуты относительно колебаний координаты на π.

Ускорение и координата одновременно становятся максимальными по модулю, но имеют противоположные знаки. В подобных случаях говорят, что колебания происходят в противофазе (рис. 15, *а, в*).

Относительно колебаний скорости фаза колебаний ускорения сдвинута на $\pi/2$, а амплитуда ускорения связана с амплитудой скорости соотношением

$$a_м = v_м \omega_0.$$

§ 10. ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ И ПЕРИОДА СВОБОДНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ОТ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ

В § 6 было выяснено, что коэффициент пропорциональности k/m между ускорением и координатой в уравнении движения (1.4) представляет собой квадрат собственной частоты колебаний системы.

Собственная частота колебаний тела на пружине равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{1.23}$$

Она тем больше, чем больше жесткость пружины, и тем меньше, чем больше масса тела. Это естественно: жесткая пружина сообщает телу большее ускорение, быстрее меняет скорость тела; а чем тело массивнее, тем медленнее оно изменяет скорость под влиянием данной силы. Период колебаний равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \tag{1.24}$$

Располагая набором пружин различной жесткости и телами различной массы, нетрудно убедиться, что формулы (1.23) и (1.24) правильно описывают характер зависимости ω_0 и T от k и m.

Коэффициент пропорциональности между тангенциальным ускорением и смещением в уравнении (1.10), описывающем колебания маятника, также представляет собой квадрат циклической частоты. Следовательно, собственная частота математического маятника при малых углах отклонения нити от вертикали зависит от длины маятника и ускорения свободного падения так:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}. \tag{1.25}$$

Период же колебаний равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \tag{1.26}$$

Эта формула была впервые получена и проверена на опыте голландским ученым Гюйгенсом, современником Ньютона.

Период колебаний возрастает с увеличением длины маятника. От массы маятника он не зависит. Это легко проверить на опыте с различными маятниками. Зависимость периода от ускорения свободного падения также можно обнаружить. Чем меньше g, тем больше период колебаний маятника и, следовательно, тем медленнее идут часы с маятником. Так, часы с маятником в виде груза на стержне отстанут в сутки почти на 3 с, если их поднять из подвала на верхний этаж Московского университета (высота 200 м). И это только за счет уменьшения ускорения свободного падения с высотой.

Зависимость периода колебаний маятника от значения g используется на практике. Измеряя период колебаний, можно очень

точно определить g. Ускорение свободного падения, как вам известно из VIII класса, меняется с географической широтой. Но и на данной широте оно не везде одинаково. Ведь плотность земной коры не всюду одинакова. В районах, где залегают плотные породы, ускорение g несколько больше. Этим пользуются при поисках полезных ископаемых.

Так, железная руда обладает повышенной плотностью по сравнению с обычными породами. Проведенные под руководством академика А. А. Михайлова измерения ускорения свободного падения под Курском позволили уточнить места залегания железной руды, обнаруженные первоначально с помощью магнитных измерений.

Замечательным является то, что период колебаний тела на пружине и период колебаний маятника при малых углах отклонения не зависят от амплитуды колебаний. Наглядно это можно представить себе так. При увеличении амплитуды в два раза сила, направленная к положению равновесия, также увеличится в два раза. В два раза возрастет ускорение и в два раза большее значение будет иметь приобретенная скорость. В результате вдвое больший путь к положению равновесия тело проделает за то же время, что и при колебаниях с первоначальной (в два раза меньшей) амплитудой.

§ 11. ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

Сместив шарик на пружине (см. рис. 3) вправо на расстояние $x_м$, мы сообщаем колебательной системе запас потенциальной энергии $П_м = \frac{kx_м^2}{2}$. При движении шарика влево деформация пружины становится меньше и потенциальная энергия уменьшается. Но одновременно увеличивается скорость и, следовательно, растет кинетическая энергия. В момент прохождения шариком положения равновесия потенциальная энергия становится минимальной. Кинетическая же энергия достигает максимума.

После прохождения положения равновесия скорость начинает уменьшаться. Следовательно, уменьшается и кинетическая энергия. Потенциальная же энергия снова растет; в крайней левой точке она достигает максимума, а кинетическая энергия становится равной нулю. Таким образом, при колебаниях периодически происходит переход потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Это же самое можно проследить и на колебаниях маятника.

Полная механическая энергия при колебаниях тела на пружине равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = K + П = \frac{mv_x^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \qquad (1.27)$$

Кинетическая и потенциальная энергии периодически изменяются, но полная механическая энергия замкнутой системы, в которой отсутствуют силы сопротивления, остается согласно закону сохранения энергии неизменной. Она равна либо потенциальной энергии в момент максимального отклонения от положения равновесия, либо же кинетической энергии в момент, когда тело проходит положение равновесия:

$$E = \frac{kx_м^2}{2} = \frac{mv_м^2}{2}. \qquad (1.28)$$

Учитывая, что $v_м = \omega_0 x_м = \sqrt{\frac{k}{m}}\, x_м$, легко видеть, что уравнение (1.28) действительно выполняется.

Таким образом, энергия колеблющегося тела прямо пропорциональна квадрату амплитуды колебаний координаты (или квадрату амплитуды колебаний скорости).

§ 12. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

Свободные колебания груза на пружине или маятника являются гармоническими лишь в том случае, когда нет трения. Но силы трения, или, точнее, силы сопротивления, хотя, может быть, и малые, всегда действуют на колеблющееся тело.

Силы сопротивления совершают отрицательную работу и тем самым уменьшают механическую энергию системы. Поэтому с течением времени максимальные отклонения тела от положения равновесия становятся все меньше и меньше. В конце концов после того, как запас механической энергии окажется исчерпанным, колебания прекратятся совсем. Колебания при наличии сил сопротивления являются затухающими.

График зависимости координаты тела от времени при затухающих колебаниях изображен на рисунке 16. Этот график можно получить с помощью маятника с песочницей, изображенного на рисунке 8, если к нитям подвеса прикрепить лист плотной бумаги для увеличения силы сопротивления воздуха.

При включении электроизмерительных приборов (амперметра, вольтметра) стрелка не сразу устанавливается в положение

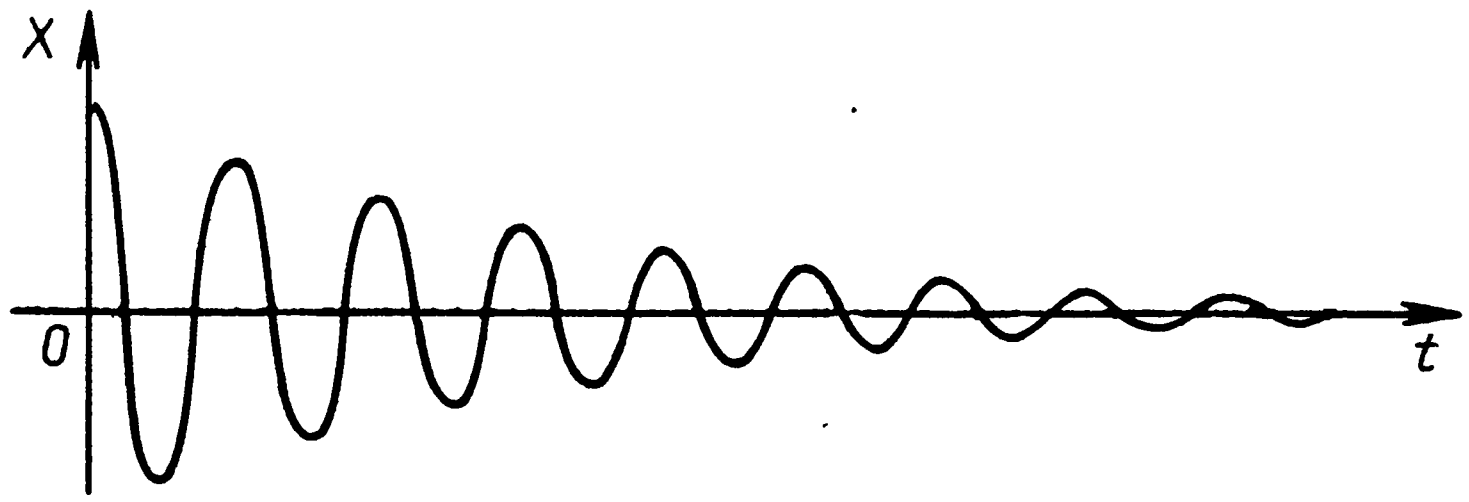


Рис. 16

равновесия, соответствующее определенному значению измеряемой величины, а совершает некоторое время колебания. Чтобы не тратить много времени на отсчет показаний, желательно увеличить затухание колебаний стрелки. Это достигается с помощью особых устройств. В частности, если к стрелке прикрепить металлическую пластину, помещенную между полюсами магнита, то колебания быстро затухают из-за взаимодействия индукционных токов в пластине с магнитным полем магнита.

В автомобилях применяются специальные амортизаторы для гашения колебаний кузова на рессорах при езде по неровной дороге. При колебаниях кузова связанный с ним поршень движется в цилиндре, заполненном жидкостью. Жидкость перетекает через специальные отверстия в поршне, что приводит к появлению больших сил сопротивления и быстрому затуханию колебаний.

? **1. Во сколько раз увеличится амплитуда колебаний скорости и ускорения при увеличении частоты колебаний в два раза? Амплитуда колебаний координаты остается неизменной.**
2. Как меняются скорость и ускорение при гармонических колебаниях в момент времени, когда координата тела уменьшается по модулю?
3. Когда часы с маятником идут быстрее: летом или зимой?
4. Почему частота колебаний тела на пружине зависит от его массы, а частота колебаний математического маятника от массы не зависит?
5. Два маятника представляют собой шарики одинакового радиуса, подвешенные на нитях равной длины. Массы шариков различны. Колебания какого из маятников затухнут быстрее: легкого или тяжелого?

§ 13. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Свободные колебания всегда затухают за то или иное время, и по этой причине они редко используются на практике. Наиболее важное значение имеют незатухающие колебания, которые могут длиться сколь угодно долго.

Наиболее простой способ возбуждения незатухающих колебаний состоит в том, что на систему воздействуют внешней периодической силой.

Колебания, совершающиеся под действием внешней периодической силы, называются вынужденными.

Работа этой силы над системой обеспечивает приток энергии к системе извне. Приток энергии не дает колебаниям затухать, несмотря на действие сил трения.

Под влиянием периодической силы любое тело или система будет совершать колебания. Такие колебания совершают, например, сита различных сортировочных машин.

Особый интерес представляют вынужденные колебания в системе, способной совершать свободные колебания. С этим случаем знакомы все, кому приходилось раскачивать ребенка на качелях.

Качели — это маятник, обладающий определенной собственной частотой. Отклонить на большой угол качели от положения

равновесия с помощью постоянной во времени силы трудно. Не раскачает качели взрослый человек и в том случае, если он будет их беспорядочно подталкивать в разные стороны. Однако, если начать в правильном ритме подталкивать качели вперед каждый раз, когда они поравняются с нами, можно без большого напряжения раскачать их очень сильно. Правда, для этого потребуется некоторое время.

Чтобы раскачать качели до больших амплитуд, частота внешней силы должна равняться частоте свободных колебаний качелей (маятника).

Вот эта возможность значительного увеличения амплитуды колебаний маятника или любой другой системы, способной совершать свободные колебания, при совпадении частоты внешней периодической силы с собственной частотой колебательной системы и представляет главный интерес.

Рассмотрим вынужденные колебания в системе, обладающей собственной частотой колебаний. Вместо маятника удобнее взять шарик на пружинах. Но теперь пусть конец одной из пружин будет прикреплен к нити, перекинутой через блок (рис. 17). Другой конец нити соединен со стерженьком на диске. Если вращать диск с помощью электродвигателя, то на шарик начнет действовать периодическая внешняя сила.

Постепенно шарик начнет раскачиваться. Амплитуда колебаний нарастает. Спустя некоторое время колебания приобретут установившийся характер: их амплитуда со временем перестанет изменяться. Присмотревшись внимательно, вы обнаружите, что частота колебаний шарика будет в точности равна частоте колебаний конца пружины, т. е. частоте изменения внешней силы. (Эта частота равна числу оборотов диска в секунду.)

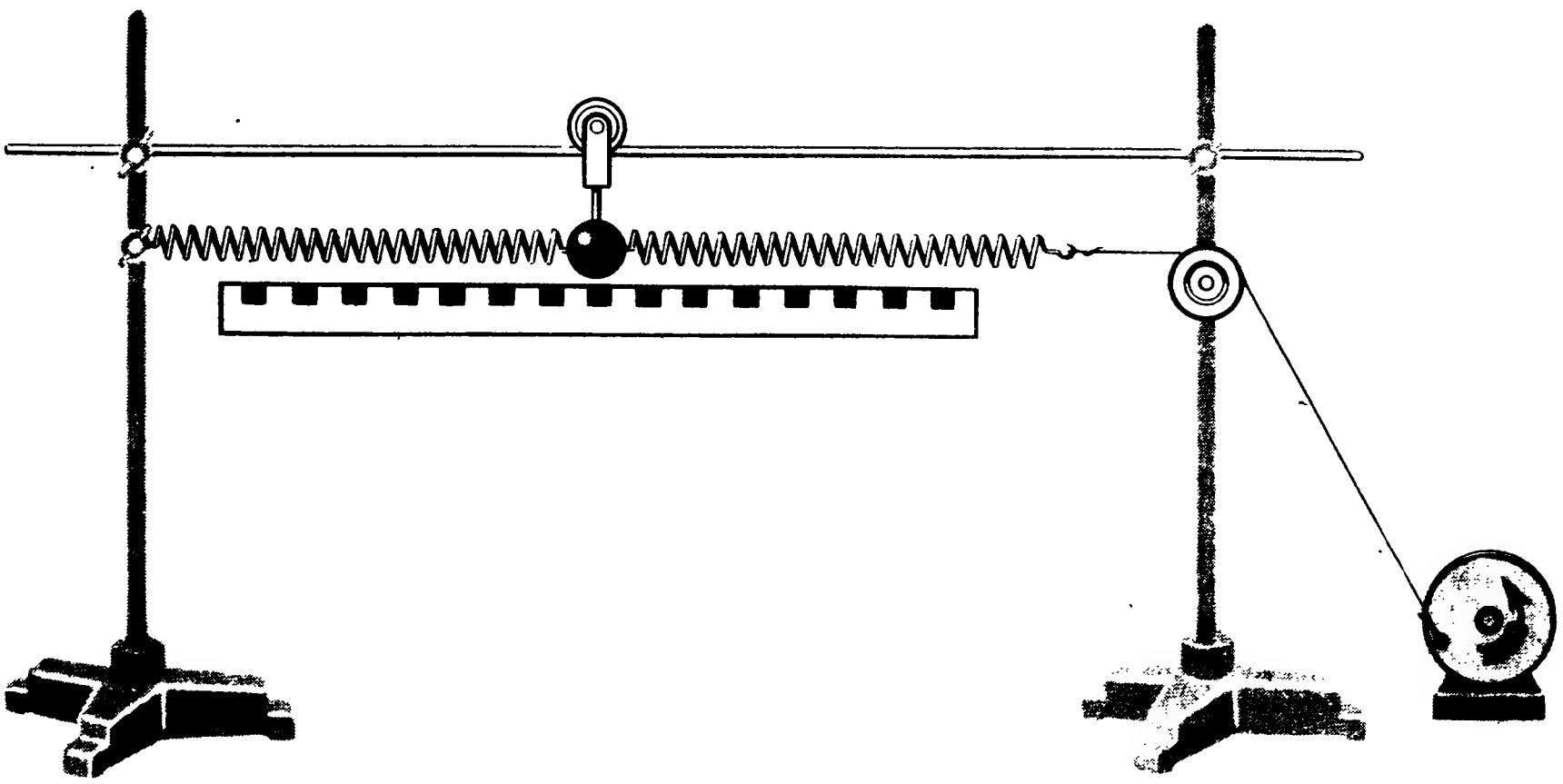


Рис. 17

§ 14. РЕЗОНАНС

При установившихся вынужденных колебаниях частота колебаний всегда равна частоте внешней силы.

Пользуясь установкой, изображенной на рисунке 17, выясним, как амплитуда установившихся вынужденных колебаний зависит от частоты.

Плавно увеличивая частоту внешней силы, мы заметим, что амплитуда колебаний растет. Она достигает максимума, когда внешняя сила действует в такт со свободными колебаниями шарика. Точно так же амплитуда колебаний качелей достигает максимума, если подталкивать их с частотой, равной частоте свободных колебаний.

При дальнейшем увеличении частоты амплитуда установившихся колебаний опять уменьшается (рис. 18). При очень больших частотах внешней силы она стремится к нулю, так как тело вследствие своей инертности не успевает заметно смещаться за малые промежутки времени и «дрожит на месте».

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы, действующей на систему, с частотой свободных колебаний называется резонансом [1] (от латинского слова resonans — дающий отзвук).

Объяснить это явление можно проще всего, исходя из энергетических соображений.

При резонансе амплитуда вынужденных колебаний максимальна благодаря тому, что создаются наиболее благоприятные условия для передачи энергии от внешнего источника периодической силы к системе. Для этого внешняя сила должна действовать в такт со свободными колебаниями. На протяжении всего периода ее направление совпадает с направлением скорости колеблющегося тела. Поэтому на протяжении всего периода эта сила совершает только положительную работу. При установившихся колебаниях положительная работа внешней силы равна по модулю отрицательной работе силы сопротивления, пропорциональной скорости движения тела.

Проекции силы сопротивления и скорости имеют противоположные знаки. Поэтому при резонансе колебания силы со-

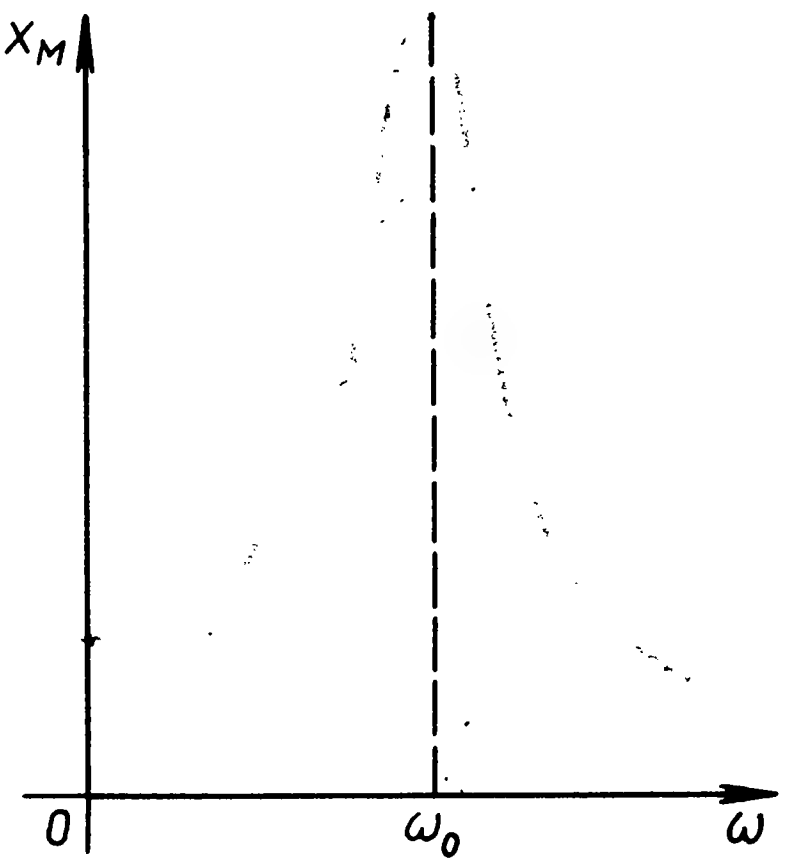


Рис. 18

[1] В действительности из-за влияния трения резонанс наступает при частоте внешней силы, немного меньшей собственной частоты колебательной системы.

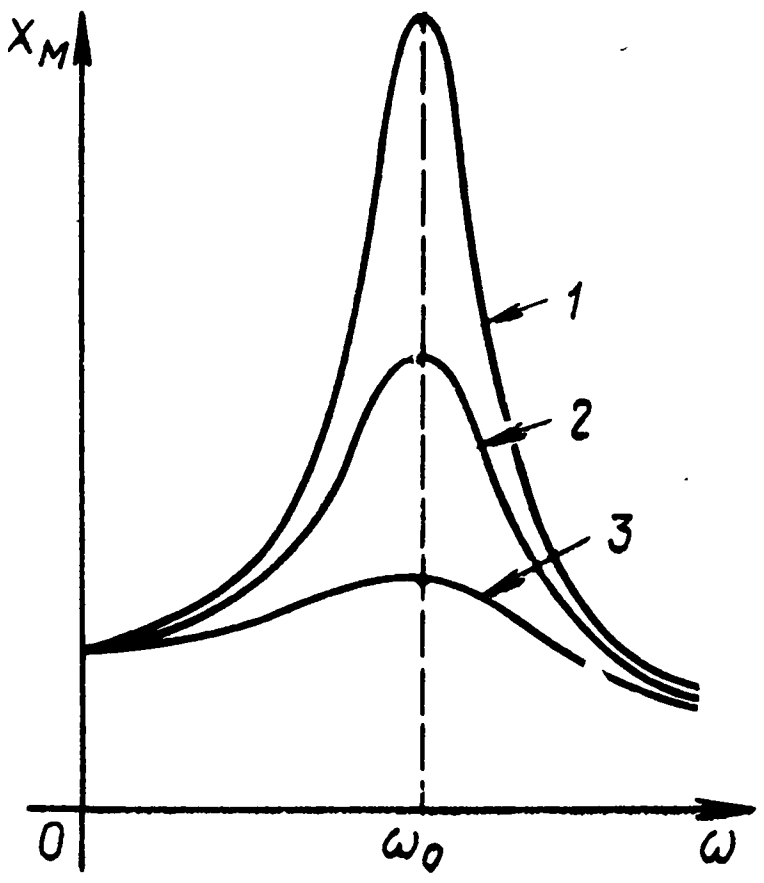


Рис. 19

противления сдвинуты по фазе относительно колебаний внешней силы на π (колебания этих сил происходят в противофазе). Внешняя сила и сила сопротивления равны по модулю и направлены в противоположные стороны. Таким образом, внешняя сила компенсирует силу сопротивления. В результате ускорение телу сообщает только сила упругости пружины, и колебания происходят с собственной частотой, которая оказывается равной частоте внешней силы.

Если частота внешней силы не равна собственной частоте ω_0 колебаний системы, то внешняя сила лишь в течение части периода совершает положительную работу. В течение же другой части периода направление силы противоположно направлению скорости, и работа отрицательна. В целом работа внешней силы за период невелика и соответственно невелика амплитуда установившихся колебаний.

Существенное влияние на резонанс оказывает трение в системе. При резонансе положительная работа внешней силы целиком идет на покрытие расхода энергии за счет отрицательной работы силы сопротивления. Чем меньше сила сопротивления, тем больше амплитуда установившихся колебаний.

Изменение амплитуды колебаний в зависимости от частоты при различных коэффициентах трения и одной и той же амплитуде внешней силы изображено на рисунке 19. Кривой *1* соответствует минимальное трение, а кривой *3* — максимальное. На этом рисунке хорошо видно, что **возрастание амплитуды вынужденных колебаний при резонансе выражено тем отчетливее, чем меньше трение в системе.**

При малом трении резонанс «острый», а при большом — «тупой». Если частота колебаний далека от резонансной, то амплитуда колебаний мала и почти не зависит от силы сопротивления в системе.

В системе с малым трением амплитуда колебаний при резонансе может быть очень большой даже в том случае, когда внешняя сила мала. Но надо хорошо представить себе, что большая амплитуда установится только спустя продолжительное время после начала действия внешней силы. В соответствии с законом сохранения энергии сообщить системе большую амплитуду колебаний, а значит, и большую энергию с помощью сравнительно небольшой внешней силы можно только за большое время. Если

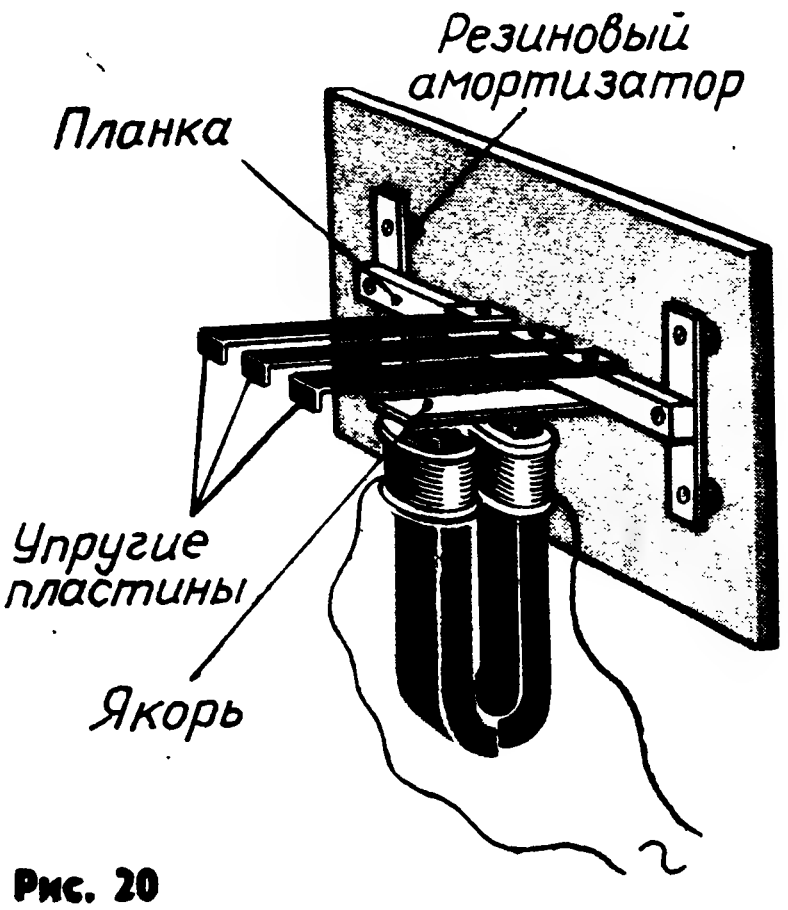


Рис. 20

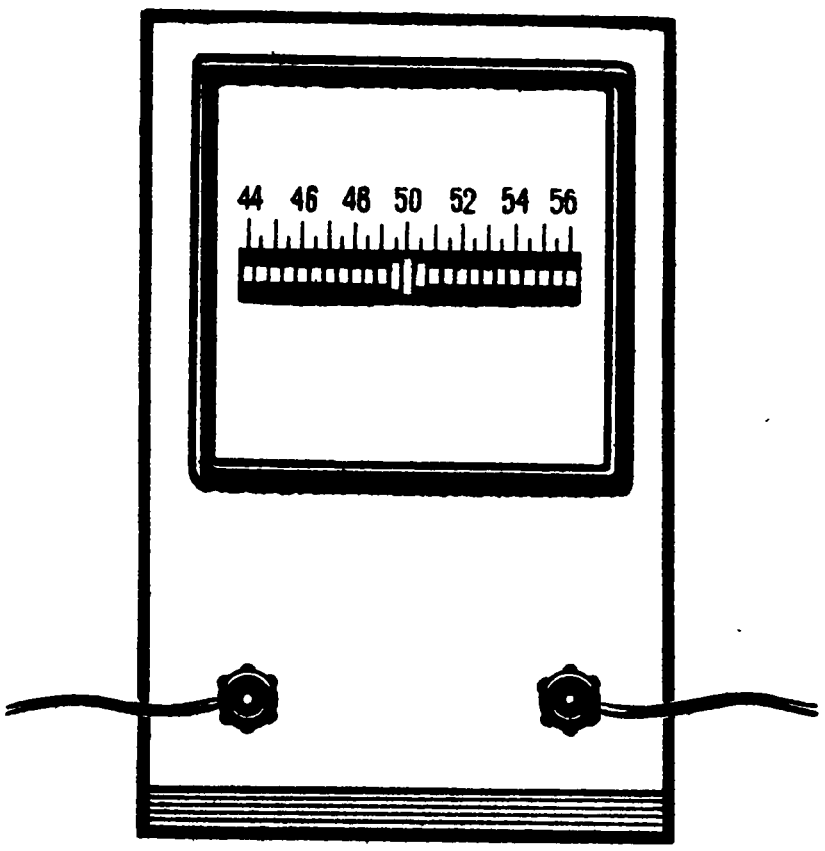


Рис. 21

трение велико, то амплитуда колебаний будет небольшой и для установления колебаний не требуется много времени.

О резонансе имеет смысл говорить, если затухание свободных колебаний в системе мало. Иначе амплитуда вынужденных колебаний при $\omega = \omega_0$ мало отличается от амплитуды колебаний при других частотах. В этом можно убедиться, помещая колеблющийся груз в вязкую жидкость.

§ 15. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСА И БОРЬБА С НИМ

Если какая-либо колебательная система находится под действием внешней периодической силы, то может наступить резонанс и связанное с ним резкое увеличение амплитуды колебаний.

Любое упругое тело, будь то мост, станина машины, ее вал, корпус корабля, представляет собой колебательную систему и характеризуется собственными частотами колебаний. При работе двигателей нередко возникают периодические усилия, связанные с движением частей двигателя (например, поршней) или же с недостаточно точной центровкой их вращающихся деталей (например, валов). Если частота периодических усилий совпадает с частотой свободных колебаний, то возникает резонанс. Колебания могут возрасти настолько, что возможна поломка машин, хотя напряжение в материале и не превышает предела прочности при статических нагрузках. Дело в том, что железо, сталь и другие материалы при переменных нагрузках более или менее быстро теряют прочность, после чего внезапно разрушаются.

Во всех этих случаях принимаются специальные меры, чтобы не допустить наступления резонанса или ослабить его действие. Для этого увеличивают трение в системе или же добиваются, чтобы собственные частоты колебаний не совпадали с частотой

внешней силы. Известны случаи, когда приходилось перестраивать океанские лайнеры, чтобы уменьшить вибрацию.

При переходе через мост воинским частям запрещается идти в ногу. Строевой шаг приводит к периодическому воздействию на мост. Если случайно частота этого воздействия совпадает с собственной частотой колебаний моста, то он может разрушиться.

Мы приводили примеры вредных последствий резонанса. Но есть и полезные. Например — раскачивание качелей.

На явлении резонанса основано устройство *частотомера* — прибора для измерения частоты переменного тока. Прибор состоит из набора упругих пластин с грузиками на концах. Пластины закреплены на общей планке (рис. 20). Каждая пластина обладает определенной собственной частотой колебаний, зависящей от ее упругих свойств, длины и массы.

Собственные частоты колебаний пластин известны. Под действием электромагнита планка, а с ней вместе и все пластины совершают вынужденные колебания. Но лишь та пластина, собственная частота колебаний которой совпадает с частотой колебаний планки, будет иметь большую амплитуду колебаний. Это и позволяет определить частоту переменного тока (рис. 21).

Со многими другими, гораздо более важными применениями резонанса мы познакомимся в дальнейшем.

§ 16. РОЛЬ МАЯТНИКА В ЧАСАХ. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Незатухающие вынужденные колебания требуют для своего поддержания внешней периодической силы.

Однако колебания в системе могут быть незатухающими и без действия внешней периодической силы. Если внутри системы, способной совершать свободные колебания, имеется источник энергии и система сама может регулировать поступление энергии к колеблющемуся телу для компенсации потерь на трение, то в ней могут возникнуть незатухающие колебания.

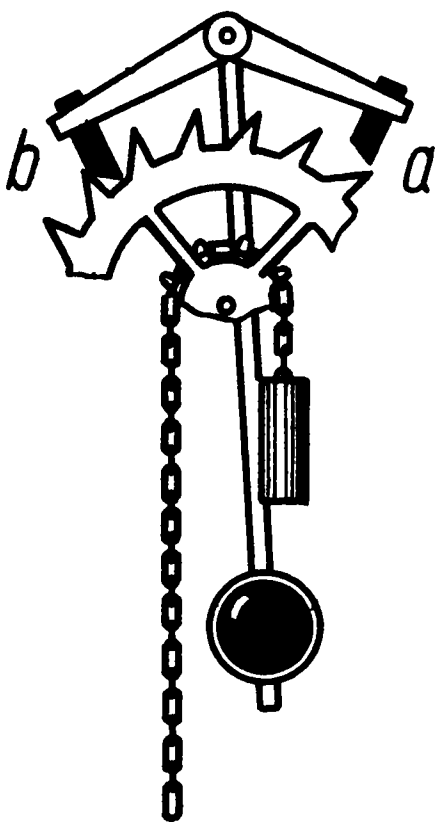


Рис. 22

Простой системой такого типа являются обыкновенные часы с маятником. Система обладает определенным запасом энергии—потенциальной энергией гири, поднятой над землей, или энергией сжатой пружины. Груз приводит во вращение *храповое колесо* с косыми зубцами (рис. 22). С маятником скреплена дугообразная планка *ab* — *анкер* [1] с двумя выступами по краям. С помощью анкера маятник управляет вращением храпового колеса и связанной с ним стрелки часов. При этом энергия от гири порциями поступает к маятнику. В изоб-

[1] Немецкое слово *анкер* означает якорь.

раженном на рисунке положении зубец давит на скос выступа *b* анкера и толкает маятник влево. После прохождения положения равновесия выступ *b* соскальзывает с зубца, но почти сразу же анкер внешним скосом выступа *a* упирается в другой зубец храповика, и маятник получает импульс в другую сторону. В результате дважды за период маятник получает энергию, сам открывая и закрывая доступ энергии от источника.

Незатухающие колебания маятника происходят с частотой, почти точно равной частоте его свободных колебаний, если трение мало. Именно поэтому часы обладают регулярным ходом. Впервые маятник был применен для достижения регулярного хода часов Гюйгенсом в 1657 г. В часах с заводной пружиной вместо маятника обычно применяется балансир (колесико с пружиной), совершающий крутильные колебания вокруг своей оси.

Системы, подобные часам, в которых генерируются незатухающие колебания за счет поступления энергии от источника, называются *автоколебательными системами.* К автоколебательным системам относятся электрический звонок с прерывателем, органная труба, свисток и многое другое. Наше сердце и легкие тоже можно рассматривать как автоколебательные системы.

Незатухающие колебания, которые могут существовать в системе без воздействия на нее внешних периодических сил, называются автоколебаниями.

В то время как частота вынужденных колебаний совпадает с частотой внешней силы, а амплитуда колебаний зависит от амплитуды этой силы, частота и амплитуда автоколебаний определяются свойствами самой системы. Автоколебания отличаются и от свободных колебаний тем, что, во-первых, они не затухают с течением времени и, во-вторых, их амплитуда не зависит от величины начального кратковременного воздействия («толчка»), которое возбуждает колебания.

* * *

Мы заканчиваем знакомство с механическими колебаниями. Нужно обратить внимание на одну общую для всех колебаний черту, отличающую их от других видов механического движения.

Как правило, при рассмотрении механического движения тел, например космических кораблей или планет под действием сил всемирного тяготения, задача состоит в нахождении положения тела и его скорости в любой момент времени. Но **при изучении периодических колебательных процессов главный интерес представляют общие признаки, характеризующие повторяемость движений, а не положение и скорость колеблющегося тела в любой момент времени.** Важно знать амплитуду, период колебаний, т. е. величины, характеризующие процесс в целом. При вынужденных колебаниях надо знать отношение частот вынуждающей силы и свободных колебаний. Именно оно определяет характер течения процесса, его интенсивность.

?

1. Приходилось ли вам наблюдать явления резонанса дома или на улице?
2. Для того чтобы удержать открытую дверь в вестибюле метро (дверь открывается в обе стороны и возвращается в положение равновесия пружинами), нужно приложить к ручке двери силу около 50 Н. Можно ли открыть дверь, приложив к той же ручке силу 0,005 Н? Трением в петлях двери пренебречь.
3. При каком условии резонансные свойства колебательной системы проявляются отчетливо?
4. Приведите примеры автоколебательных систем, не упомянутых в тексте.
5. В чем состоит отличие автоколебаний от вынужденных колебаний и от свободных колебаний?

УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Груз массы $m=100$ г совершает колебания с частотой $\nu=2$ Гц под действием пружины. Найти жесткость k пружины.
2. Длина маятника Фуко в Исаакиевском соборе в Ленинграде 98 м. Чему равен период колебаний этого маятника?
3. Один из маятников совершил $n_1=10$ колебаний. Другой за это же время совершил $n_2=6$ колебаний. Разность длин маятников $\Delta l=16$ см. Найти длины маятников l_1 и l_2.
4. Как изменится период колебаний маятника при перенесении его с Земли на Луну? Масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, а радиус Земли в 3,7 раза больше радиуса Луны.
5. Шарик, подвешенный на длинной нити, отклонили от положения равновесия на малый угол и отпустили. Другой шарик падает свободно без начальной скорости из точки подвеса нити. Какой из шариков быстрее достигает положения равновесия первого шарика, если оба они начали движение одновременно?
6. Шарик на пружине сместили на расстояние 1 см от положения равновесия и отпустили. Какой путь пройдет шарик за 2 с, если частота его колебаний $\nu=5$ Гц? Затуханием колебаний можно пренебречь.
7. Координата тела, совершающего гармонические колебания по оси OX, меняется по закону $x=5\cos 2\pi t$. Координата измеряется в сантиметрах, а время в секундах. Определите амплитуду колебаний скорости и проекцию скорости на ось в момент, когда фаза колебания координаты равна $^5/_6\pi$.
8. Тело массой 200 г совершает колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой 2 см под действием пружины жесткостью $16\,\frac{H}{м}$. Определить циклическую частоту колебаний тела, энергию системы и амплитуду скорости.
9. По дну сферической чаши совершает свободные колебания без трения маленький кубик (рис. 23). Каков период его колебаний, если радиус кривизны чаши R?
10. Автомобиль движется по неровной дороге, на которой расстояние между буграми равно приблизительно 8 м. Период свободных колебаний автомобиля на рессорах 1,5 с. При какой скорости автомобиля его колебания в вертикальной плоскости станут особенно заметными?

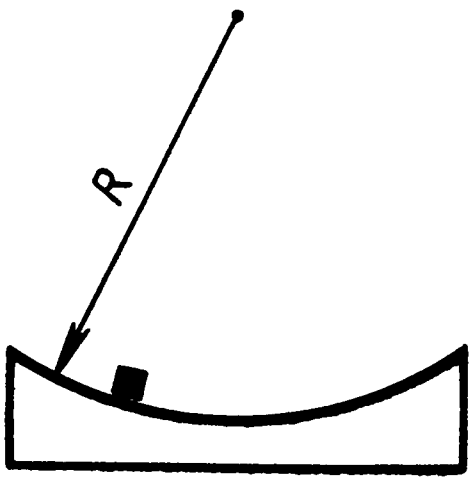


Рис. 23

Глава II

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 17. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Электрические колебания были открыты в известной мере случайно. После того как изобрели лейденскую банку (первый конденсатор) и научились сообщать ей большой заряд с помощью электростатической машины, начали наблюдать электрический разряд банки. Замыкая обкладки лейденской банки с помощью проволочной катушки, обнаружили, что стальные спицы внутри катушки намагничиваются. В этом ничего странного не было: электрический ток и должен намагничивать стальной сердечник катушки. Удивительным было то, что нельзя было предсказать, какой конец сердечника катушки окажется северным полюсом, а какой южным. Повторяя опыт примерно в одних и тех же условиях, получали в одних случаях один результат, а в других — другой. Далеко не сразу поняли, что при разряде конденсатора через катушку возникают колебания. За время разрядки конденсатор успевает много раз перезарядиться, и ток меняет направление много раз. Из-за этого сердечник может намагничиваться различным образом.

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называют электрическими колебаниями.

Получить электрические колебания почти столь же просто, как и заставить тело колебаться, подвесив его на пружине. Но наблюдать электрические колебания уже не так просто. Ведь мы непосредственно не видим ни перезарядки конденсатора, ни тока в катушке. К тому же колебания обычно происходят с очень большой частотой.

Для наблюдения и исследования электрических колебаний самым подходящим прибором является электронный осциллограф.

В электроннолучевой трубке осциллографа узкий пучок электронов попадает на экран, способный светиться при бомбардировке его электронами. На горизонтально отклоняющие пластины подается переменное напряжение развертки $u_р$ «пилообразной» формы (рис. 24). Сравнительно медленно напряжение нарастает, а потом очень

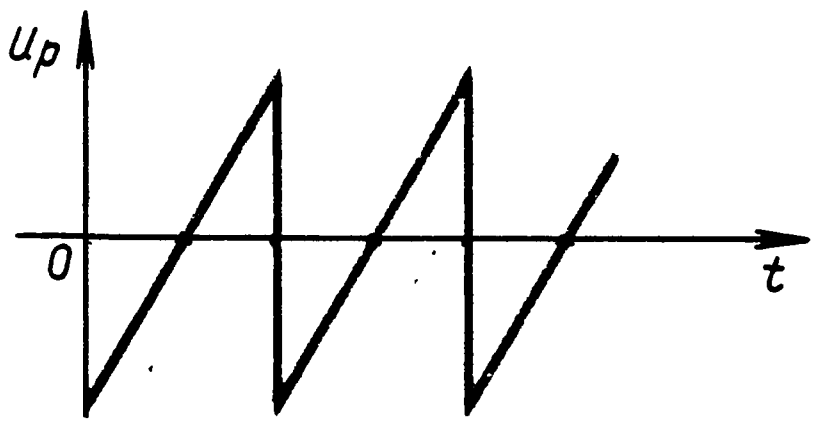


Рис. 24

Рис. 25

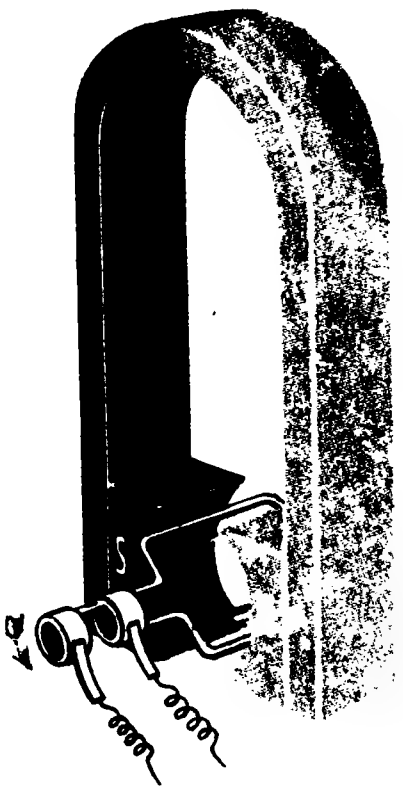


Рис. 26

резко уменьшается. Электрическое поле между пластинами заставляет электронный луч пробегать экран в горизонтальном направлении с постоянной скоростью и затем почти мгновенно возвращаться назад. После этого весь процесс повторяется. Если теперь присоединить вертикально отклоняющие пластины к конденсатору, то колебания напряжения при его разрядке вызовут колебания луча в вертикальном направлении. В результате на экране образуется временна́я «развертка» колебаний (рис. 25), вполне подобная той, которую вычерчивает маятник с песочницей на движущемся листе бумаги. Колебания затухают с течением времени [1].

Эти колебания являются *свободными*. Они возникают после того, как конденсатору сообщается заряд, выводящий систему из состояния равновесия. Зарядка конденсатора эквивалентна отклонению маятника от положения равновесия.

Нетрудно получить в электрической цепи также *вынужденные электрические колебания*. Такие колебания появляются при наличии в цепи периодической электродвижущей силы. Переменная ЭДС возникает в проволочной рамке из нескольких витков при вращении ее в однородном магнитном поле (рис. 26). При этом магнитный поток, пронизывающий рамку, периодически изменяется. В соответствии с законом электромагнитной индукции периодически меняется и ЭДС индукции. Происхождение ЭДС индукции в этом случае таково: на движущиеся вместе с проводниками рамки электроны действует сила со стороны магнитного поля. Она вызывает перемещение электронов вдоль проводников. При замыкании цепи через гальванометр пойдет переменный ток и стрелка начнет колебаться около положения равновесия.

---

[1] Однако колебания в контуре затухают за малые доли секунды. Поэтому для их наблюдения удобно использовать осциллограф со специальным экраном, способным свéтиться длительное время после его возбуждения электронным лучом.

§ 18. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР

Простейшая система, в которой могут происходить свободные электрические колебания, состоит из конденсатора и катушки, присоединенной к обкладкам конденсатора (рис. 27). Такая система называется *колебательным контуром.*

Рассмотрим, почему в контуре возникают колебания. Пока конденсатор не заряжен, система находится в состоянии равновесия: никаких процессов в ней не происходит. Зарядим конденсатор, присоединив его на некоторое время к батарее с помощью переключателя *Пр* (рис. 28, *а*). При этом конденсатор получит энергию

$$П = \frac{q_м^2}{2C}, \qquad (2.1)$$

где $q_м$ — заряд конденсатора, а C — его электроемкость. Между обкладками конденсатора возникнет разность потенциалов $U_м$.

Далее переводим переключатель в положение *2*. Конденсатор начнет разряжаться, и в цепи появится электрический ток. Сила тока не сразу достигает максимального значения, а увеличивается постепенно. Это обусловлено явлением самоиндукции. При появлении тока возникает переменное магнитное поле. Это переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле в проводнике. (Об этом рассказывалось в IX классе.) Вихревое электрическое поле при нарастании магнитного поля направлено против тока и препятствует его мгновенному увеличению.

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока, которая определяется формулой

$$K = \frac{Li^2}{2}, \qquad (2.2)$$

где i — сила тока; L — индуктивность катушки. В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q=0$), энергия электрического поля станет равной нулю. Энергия же тока (энергия магнитного поля) согласно закону сохранения энергии будет максимальной. Следовательно, в этот момент сила тока также достигнет максимального значения $I_м$ (рис. 29, *а*).

Несмотря на то, что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не может прекратиться сразу. Этому препятствует явление самоиндукции. Как только сила тока и созданное им магнитное поле начнут уменьшаться, возникает вихревое электрическое поле, которое направлено по току и будет поддерживать его.

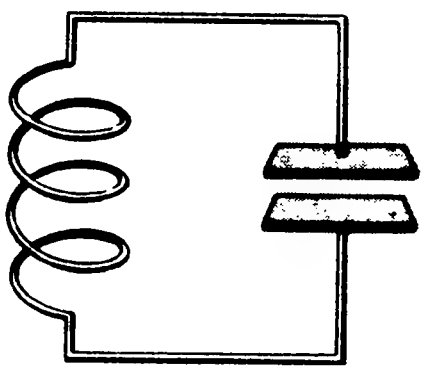


Рис. 27

В результате конденсатор перезаряжается до тех пор, пока ток, постепенно уменьшаясь, не станет равным нулю. Энергия магнитного

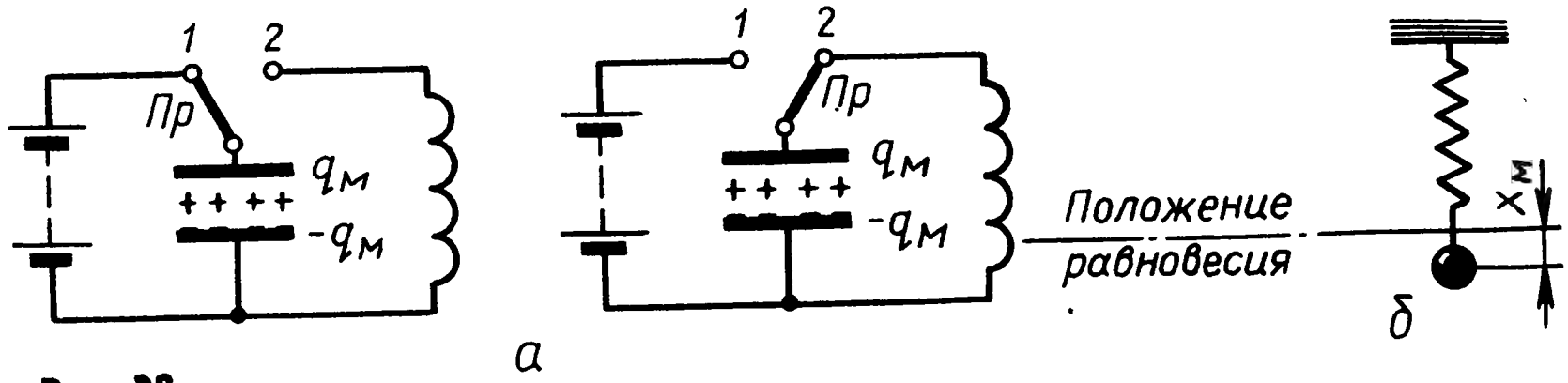
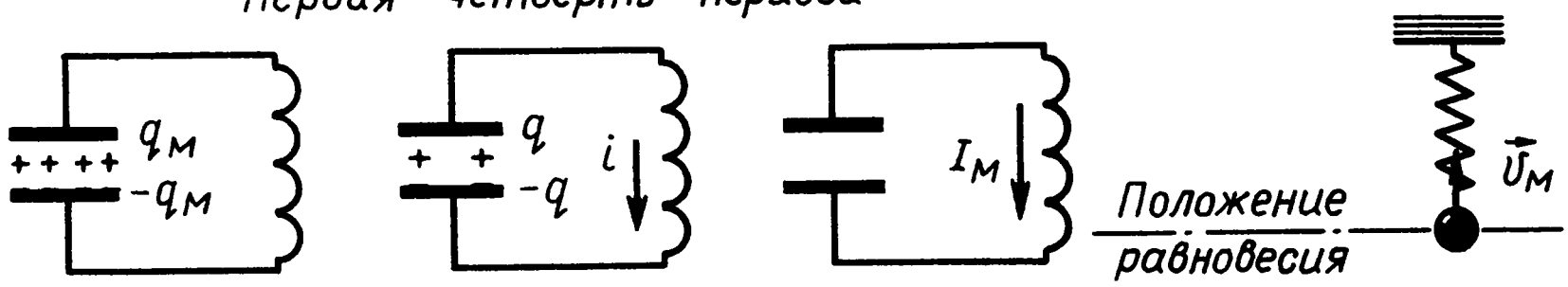


Рис. 28



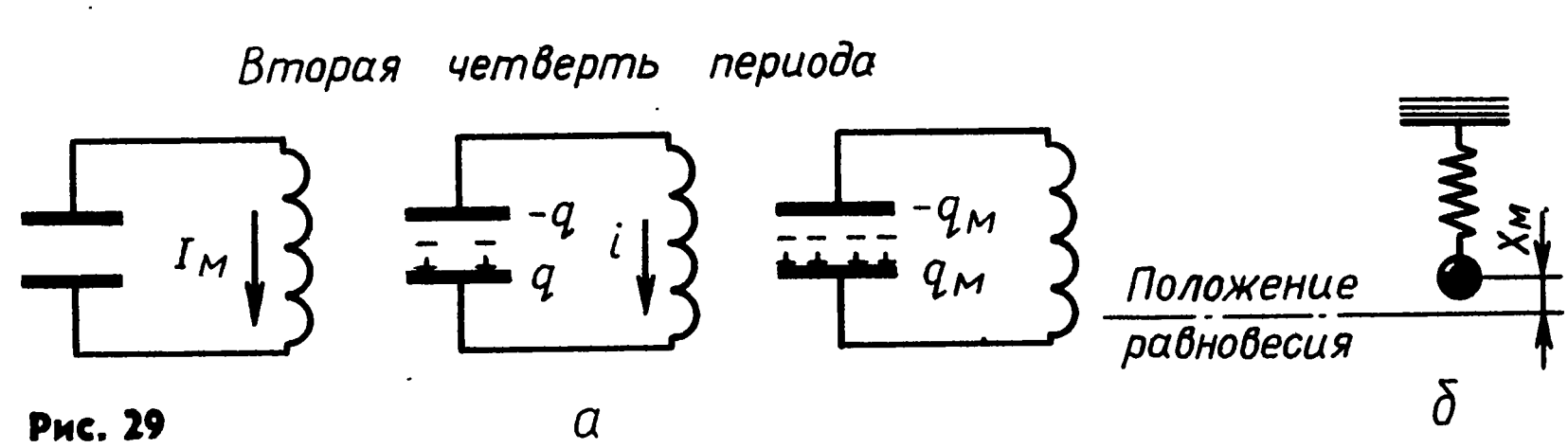


Рис. 29

поля в этот момент также будет равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора опять станет максимальной.

После этого конденсатор вновь будет перезаряжаться и система возвратится в исходное состояние. Если бы не было потерь энергии, то этот процесс продолжался бы сколь угодно долго. Колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состояние системы в точности повторялось бы.

Но в действительности потери энергии неизбежны. Так, в частности, катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R, и это ведет к превращению энергии электромагнитного поля во внутреннюю энергию проводника. Проводник нагревается.

§ 19. АНАЛОГИЯ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Электрические колебания в контуре имеют сходство со свободными механическими колебаниями, например с колебаниями груза на пружине. Сходство относится не к природе самих величин, которые периодически изменяются. Ведь при механических колебаниях периодически изменяются координата тела x и проекция его скорости v_x, а при электрических колебаниях меняются заряд конденсатора q и сила тока i в цепи. Сходными оказывают-

ся сами процессы периодического изменения величин. Одинаковый характер изменения величин (механических и электрических) объясняется тем, что имеется аналогия в условиях, порождающих механические и электрические колебания. Возвращение к положению равновесия груза на пружине вызывается силой упругости F_x, пропорциональной смещению груза от положения равновесия. Коэффициентом пропорциональности является жесткость пружины k. Разрядка конденсатора (появление тока) обусловлена напряжением u между пластинами конденсатора, которое пропорционально заряду q. Коэффициентом пропорциональности является величина $\frac{1}{C}$, обратная емкости, так как $u = \frac{1}{C} q$.

Подобно тому как вследствие инертности груз лишь постепенно увеличивает скорость под действием силы и эта скорость после прекращения действия силы не становится сразу равной нулю, электрический ток в катущке за счет явления самоиндукции увеличивается под действием напряжения постепенно и не исчезает сразу, когда это напряжение становится равным нулю. Индуктивность контура L играет ту же роль, что и масса груза m в механике. Это особенно отчетливо видно при сопоставлении кинетической энергии груза $\frac{mv_x^2}{2}$ и энергии тока $\frac{Li^2}{2}$.

Зарядке конденсатора от батареи соответствует в случае колебаний груза на пружине сообщение ему потенциальной энергии $\frac{kx_м^2}{2}$ при смещении груза (например, рукой) на расстояние $x_м$ от положения равновесия (рис. 28, *б*). Сравнивая это выражение с энергией конденсатора $\frac{q_м^2}{2C}$, замечаем, что коэффициент k аналогичен $\frac{1}{C}$, а начальная координата $x_м$ — заряду $q_м$.

Возникновение тока i за счет разности потенциалов эквивалентно появлению скорости v_x под действием силы упругости пружины (рис. 29, *б*), причем сила переменного тока в данный момент времени представляет собой согласно определению производную заряда по времени: $i = \lim\limits_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'$.

Можно подытожить все сказанное с помощью следующей таблицы.

Механические величины	Электрические величиины
Координата x	Заряд q
Скорость v_x	Сила тока i
Ускорение $a_x = v_x'$	Скорость изменения силы тока i'
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Обратная величина емкости $\frac{1}{C}$
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

§ 20. ПЕРИОД СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. УРАВНЕНИЕ, ОПИСЫВАЮЩЕЕ ПРОЦЕССЫ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Перейдем теперь к количественной теории процессов в колебательном контуре.

Формула Томсона. Наша задача в первую очередь будет заключаться в определении периода (или частоты) свободных электрических колебаний. Правда, основываясь на аналогии между свободными механическими и электрическими колебаниями, можно сразу записать выражение для частоты и периода свободных электрических колебаний. Действительно, так как в формуле для циклической частоты свободных колебаний груза на пружине $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ величина k аналогична $\frac{1}{C}$, а m — индуктивности L, то частота свободных электрических колебаний должна быть равна

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \qquad (2.3)$$

Для периода свободных колебаний в контуре можно записать:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \qquad (2.4)$$

Формула (2.4) называется формулой Томсона в честь английского физика, который ее впервые вывел.

Полученные нами результаты правильны. Однако все же считать их достаточно строго доказанными нельзя. Необходимо показать, что уравнение, описывающее электрические колебания в контуре, в математическом отношении не отличается от уравнения, описывающего свободные механические колебания. Лишь после этого мы с полной уверенностью сможем утверждать, что механические и электрические колебания управляются одними и теми же количественными законами. А это и есть самое важное.

Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре. Рассмотрим колебательный контур, сопротивлением R которого можно пренебречь (рис. 30). Уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре, можно получить с помощью закона сохранения энергии.

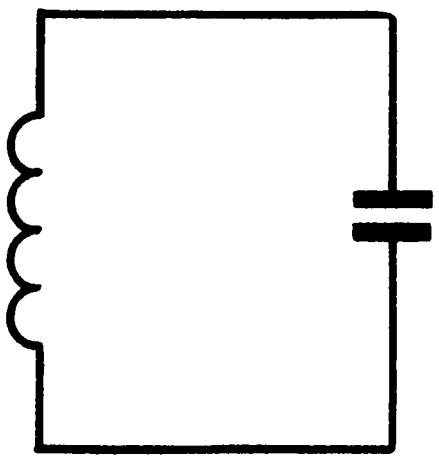


Рис. 30

Полная электромагнитная энергия E контура равна сумме энергий магнитного и электрического полей:

$$E = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}. \qquad (2.5)$$

Эта энергия не меняется с течением времени, если сопротивление контура $R = 0$.

Производная полной энергии по времени равна нулю, так как энергия постоянна. Следо-

вательно, равна нулю сумма производных по времени от энергий магнитного и электрического полей:

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' + \left(\frac{q^2}{2C}\right)' = 0,$$

или

$$\left(\frac{Li^2}{2}\right)' = -\left(\frac{q^2}{2C}\right)'. \qquad (2.6)$$

Физический смысл уравнения (2.6) состоит в том, что скорость изменения магнитной энергии равна по величине и противоположна по знаку скорости изменения электрической энергии. Именно благодаря этому полная энергия не меняется.

Вычисляя обе производные в уравнении (2.6), получим:

$$\frac{L}{2}\,2ii' = -\frac{1}{2C}\,2qq'. \qquad (2.7)$$

Но производная заряда по времени представляет собой силу тока в данный момент времени: $q' = i$. Поэтому уравнение (2.7) можно переписать в следующем виде:

$$Li'i = -\frac{qi}{C}. \qquad (2.8)$$

Производная силы тока по времени есть не что иное, как вторая производная заряда по времени; подобно тому как производная скорости (ускорение) есть вторая производная координаты по времени. Подставив в уравнение (2.8) $i' = q''$ и разделив левую и правую части этого уравнения на Li, получим основное уравнение, описывающее свободные электрические колебания в контуре:

$$q'' = -\frac{1}{LC}\,q. \qquad (2.9)$$

Теперь, наконец, вы в полной мере можете оценить значение тех усилий, которые были затрачены для изучений колебаний шарика на пружине и маятника. Смотрите, ведь уравнение (2.9) ничем, кроме обозначений, не отличается от уравнения (1.11), описывающего колебания шарика на пружине. При замене в уравнении (1.11) x на q, x'' на q'', k на $1/C$ и m на L мы в точности получим уравнение (2.9). Но уравнение (1.11) нами уже решено. Поэтому, зная, как колеблется шарик, мы сразу же можем сказать, как происходят колебания в контуре.

В уравнении (1.11) коэффициент k/m представляет собой квадрат собственной частоты колебаний. Поэтому и коэффициент $\frac{1}{LC}$ в уравнении (2.9) также представляет собой квадрат циклической частоты свободных электрических колебаний. Следовательно, формулы (2.3) и (2.4) для частоты и периода электрических колебаний можно считать строго доказанными. Конечно, и без каких-либо уравнений мы могли бы сообразить, что период T должен увеличиваться с ростом L и C. Действительно, при увеличении L ток медленнее нарастает со временем и медленнее падает до нуля.

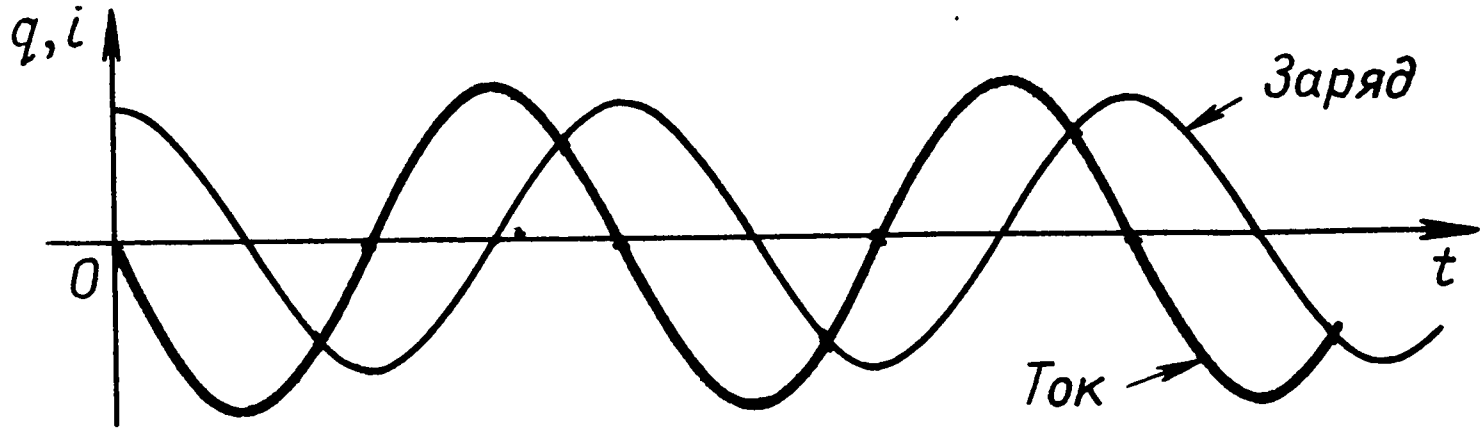


Рис. 31

А чем больше емкость, тем большее время требуется для перезарядки конденсатора. Но получить формулу (2.4) без уравнения (2.9), не привлекая аналогии между механическими и электрическими колебаниями, мы бы не смогли.

Гармонические колебания заряда и тока. Подобно тому как координата при механических колебаниях в случае, когда в начальный момент ($t=0$) отклонение от положения равновесия максимально, изменяется со временем по гармоническому закону

$$x = x_м \cos \omega_0 t,$$

заряд конденсатора меняется с течением времени по такому же закону:

$$q = q_м \cos \omega_0 t, \qquad (2.10)$$

где $q_м$ — амплитуда колебаний заряда.

Сила тока также совершает гармонические колебания:

$$i = q' = -q_м \omega_0 \sin \omega_0 t = I_м \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right), \qquad (2.11)$$

где $I_м = q_м \omega_0$ — амплитуда колебаний силы тока. Колебания силы тока смещены по фазе на $\frac{\pi}{2}$ относительно колебаний заряда (рис. 31) подобно тому, как колебания скорости при движении груза на пружине смещены по фазе на $\frac{\pi}{2}$ относительно колебаний координаты.

В действительности из-за энергетических потерь колебания будут затухающими. Чем больше сопротивление R, тем больше будет период колебаний. При достаточно большом сопротивлении колебания совсем не возникают. Конденсатор разрядится, но перезарядки его не произойдет.

?

1. В чем состоит различие между свободными и вынужденными электрическими колебаниями?

2. Проследите аналогию между электрическими колебаниями в контуре и колебаниями математического маятника.

3. Как изменится период свободных колебаний, если конденсатор контура емкости C заменить батареей из двух конденсаторов такой же емкости? Рассмотреть случаи параллельного и последовательного соединений конденсаторов.

4. Как связаны амплитуды колебаний заряда и тока при разрядке конденсатора через катушку?

§ 21. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Свободные электрические колебания в контуре быстро затухают, и поэтому они практически не используются. Напротив, незатухающие вынужденные колебания имеют огромное практическое значение.

Переменный ток в обычной осветительной сети, на заводах и фабриках представляет собой не что иное, как вынужденные электрические колебания. Сила тока меняется со временем по гармоническому закону.

Это легко обнаружить с помощью осциллографа. Если на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение от сети, то временная развертка на экране будет представлять собой синусоиду (рис. 32). Зная скорость движения луча по экрану в горизонтальном направлении (она определяется частотой «пилообразного» напряжения, которая устанавливается по усмотрению экспериментатора), можно определить частоту колебаний. Она равна 50 Гц. Это означает, что на протяжении одной секунды ток 50 раз течет в одну сторону и 50 раз в противоположную. Частота 50 Гц принята для промышленного тока во многих странах мира. Однако в некоторых странах, например в США, частота промышленного тока иная — 60 Гц.

Если напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону, то напряженность электрического поля внутри проводников будет также меняться гармонически. Эти гармонические изменения напряженности поля вызовут гармонические колебания скорости упорядоченного движения заряженных частиц. Но по-прежнему скорость упорядоченного движения электронов в данный момент времени будет пропорциональна напряженности электрического поля в этот момент времени. Поэтому, как и в случае постоянного тока, сила переменного тока определяется напряжением на концах цепи.

Рис. 32

Правда, при изменении напряжения на концах цепи электрическое поле не меняется мгновенно во всей цепи. Изменения поля распространяются хотя с очень большой, но не бесконечно большой скоростью (об этом говорилось в IX классе). Однако, если время распространения изменения поля в цепи много меньше периода

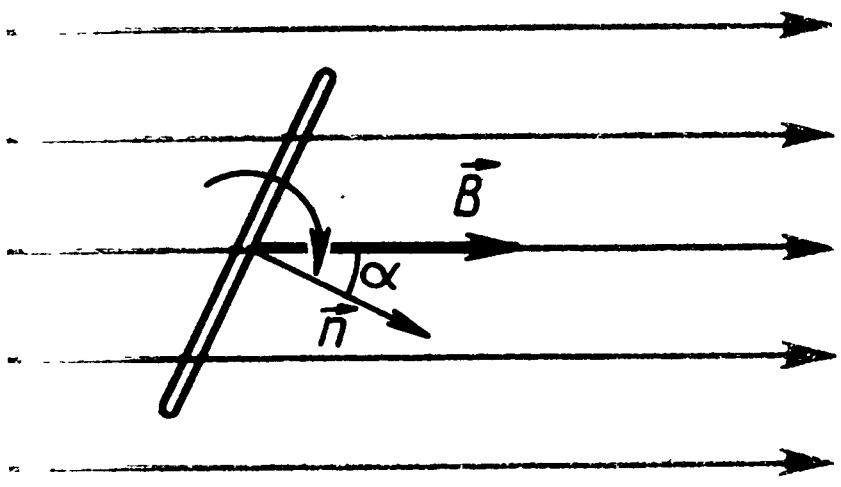


Рис. 33

колебаний напряжения, можно считать, что электрическое поле во всей цепи сразу же меняется при изменении напряжения на концах цепи. При этом сила тока в данный момент времени имеет практически одно и то же значение во всех сечениях неразветвленной цепи.

Переменное напряжение в гнездах розетки осветительной сети создается генераторами на электростанциях. В § 17 уже упоминалось о простейшей модели генератора переменного тока, преобразующего механическую энергию в электромагнитную. Поток магнитной индукции Ф, пронизывающий проволочную рамку площади S, пропорционален косинусу угла α между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции (рис. 33):

$$\Phi = BS\cos\alpha.$$

При вращении рамки с постоянной угловой скоростью угол α увеличивается прямо пропорционально времени:

$$\alpha = \omega t.$$

Поэтому поток магнитной индукции меняется гармонически:

$$\Phi = BS\cos\omega t.$$

Согласно закону электромагнитной индукции ЭДС индукции в рамке равна взятой со знаком минус скорости изменения потока магнитной индукции, т. е. производной потока магнитной индукции по времени:

$$e = -\Phi' = -BS\,(\cos\omega t)' = BS\omega\sin\omega t = \mathcal{E}_м\sin\omega t,$$

где $\mathcal{E}_м = BS\omega$ — амплитуда ЭДС индукции.

Мы будем изучать в дальнейшем вынужденные электромагнитные колебания, происходящие в цепях под действием напряжения, гармонически меняющегося с частотой ω по синусоидальному или косинусоидальному закону:

$$u = U_м\cos\omega t, \qquad (2.12)$$

где $U_м$ — амплитуда напряжения [1].

Если напряжение меняется с частотой ω, то сила тока в цепи будет меняться с той же частотой. Но фаза колебаний тока не обязательно должна совпадать с фазой напряжения, подобно тому как фаза колебаний скорости при вынужденных механических колебаниях не совпадает, вообще говоря, с фазой силы. Поэтому

[1] Замена синуса на косинус означает изменение начальной фазы напряжения на $\pi/2$. При рассмотрении вынужденных колебаний это несущественно.

в общем случае сила тока в любой момент времени (мгновенное значение силы тока) i определяется по формуле

$$i = I_м \cos(\omega t + \varphi). \qquad (2.13)$$

Здесь $I_м$ — амплитуда силы тока, а φ — разность (сдвиг) фаз между колебаниями тока и напряжения.

§ 22. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Перейдем к более детальному знакомству с тем, что происходит в цепи, подключенной к источнику переменного напряжения.

Пусть цепь состоит из соединительных проводов и нагрузки с малой индуктивностью и значительным сопротивлением R (рис. 34). Эту величину, которую мы до сих пор называли электрическим сопротивлением или просто сопротивлением, теперь будем называть *активным сопротивлением.* Дело в том, что в цепи переменного тока могут быть и сопротивления иного характера. Сопротивление же R называется активным, потому что при наличии этого сопротивления цепь поглощает энергию, поступающую от генератора. Это мы увидим в дальнейшем.

Будем считать, что напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону $u = U_м \cos \omega t$. Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения (см. § 21). Поэтому для нахождения мгновенного значения силы тока можно применить закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_м \cos \omega t}{R} = I_м \cos \omega t. \qquad (2.14)$$

На активном сопротивлении колебания силы тока по фазе совпадают с колебаниями напряжения (рис. 35), а амплитуда силы тока определяется равенством

$$I_м = \frac{U_м}{R}. \qquad (2.15)$$

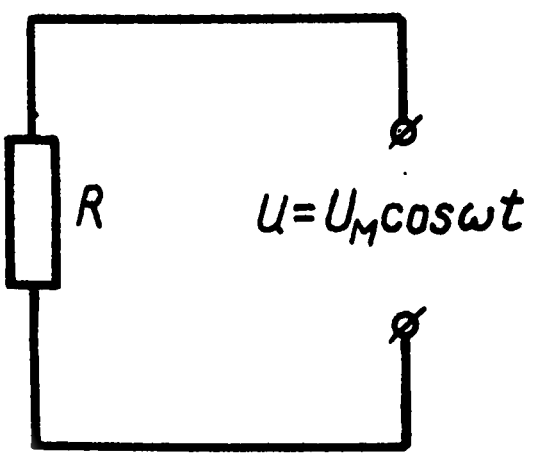


Рис. 34

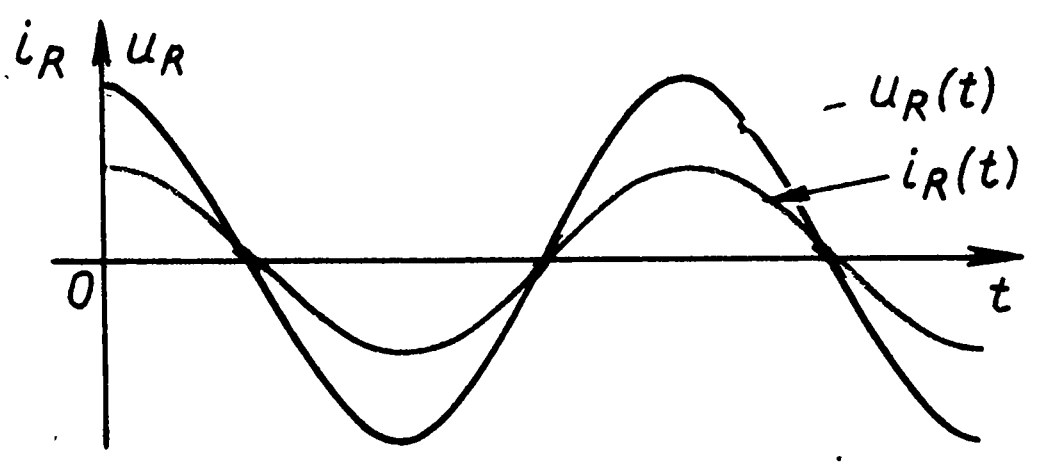


Рис. 35

§ 23. ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

В цепи переменного тока промышленной частоты (50 Гц) сила тока и напряжение изменяются сравнительно быстро. Поэтому при прохождении тока по проводнику, например по нити электрической лампочки, количество выделенной энергии также будет быстро меняться со временем. Но этих быстрых изменений мы не замечаем.

Как правило, во всех случаях нам надо знать *среднюю мощность* тока на участке цепи за большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно найти среднюю мощность за один период (в последующие периоды в цепь поступает такая же энергия). Под средней за период мощностью переменного тока понимают отношение суммарной энергии, поступающей в цепь за период, к длительности периода.

Мощность в цепи постоянного тока на участке сопротивлением R определяется формулой

$$P = I^2R. \qquad (2.16)$$

На протяжении очень малого интервала времени переменный ток можно считать неизменным. Поэтому мгновенная мощность в цепи переменного тока на участке, имеющем активное сопротивление R, определяется формулой

$$p = i^2R. \qquad (2.17)$$

Найдем среднее значение мощности за период. Для этого сначала преобразуем формулу (2.17), подставляя в нее выражение для силы тока (2.14) $i = I_м \cos \omega t$ и используя известное из математики соотношение $\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$:

$$p = \frac{I_м^2}{2} R\,(1 + \cos 2\omega t) = \frac{I_м^2 R}{2} + \frac{I_м^2 R}{2} \cos 2\omega t. \qquad (2.18)$$

Среднее за период значение $\cos 2\omega t$ равно нулю, так как на протяжении одной четверти периода эта функция пробегает ряд положительных значений, а на протяжении следующей четверти периода пробегает такой же ряд отрицательных значений (рис. 36). Поэтому средняя мощность равна первому члену в формуле (2.18):

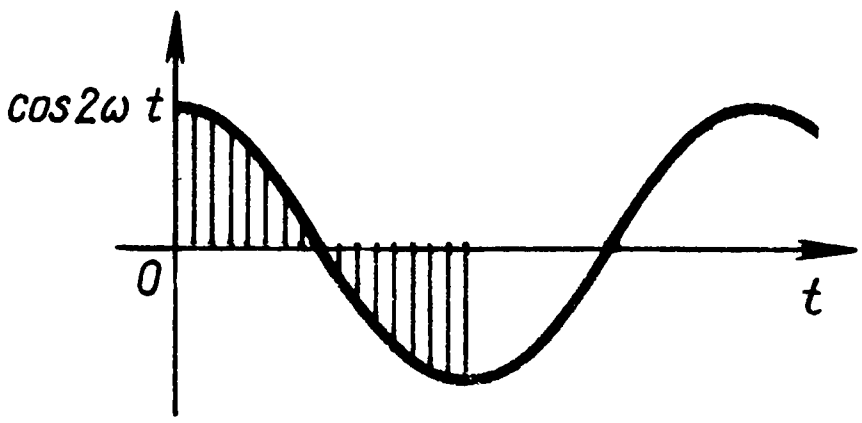


Рис. 36

$$\bar{p} = \bar{i^2}R = \frac{I_м^2}{2} R. \qquad (2.19)$$

Отсюда видно, что величина $\frac{I_м^2}{2}$ есть среднее за период значение квадрата силы тока.

$$\bar{i^2} = \frac{I_м^2}{2}. \qquad (2.20)$$

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется действующим значением силы переменного тока. Действующее значение силы переменного тока обозначается через I:

$$I = \sqrt{\overline{i^2}} = \frac{I_м}{\sqrt{2}}. \qquad (2.21)$$

Всегда можно подобрать такое значение силы постоянного тока, чтобы энергия, выделяемая за некоторое время этим током на сопротивлении R, равнялась энергии, выделяемой за то же время переменным током. Для этого необходимо, чтобы сила постоянного тока равнялась действующему значению силы переменного тока.

Действующее значение переменного напряжения определяется так же, как и действующее значение силы тока:

$$U = \sqrt{\overline{u^2}} = \frac{U_м}{\sqrt{2}}. \qquad (2.22)$$

Как и при механических колебаниях, в случае электрических колебаний обычно нас не интересуют значения тока, напряжения и других величин в каждый момент времени. Важны общие характеристики колебаний, такие, как амплитуда, период, частота, действующие значения силы тока и напряжения и средняя мощность. Именно действующие значения силы тока и напряжения регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока.

Конечно, можно было бы характеризовать переменный ток и переменное напряжение их амплитудами. Но действующие значения удобнее в том смысле, что именно они непосредственно определяют мощность переменного тока в цепи:

$$P = I^2R = UI.$$

? **1. При каких условиях в электрической цепи возникают вынужденные электрические колебания?**
2. Как связаны сила переменного тока и напряжение в цепи с активным сопротивлением?
3. В осветительных сетях переменного тока применяются напряжения 220 и 127 В. Каковы амплитуды напряжений в этих сетях?
4. Что называют действующими значениями силы тока и напряжения?

§ 24. ЕМКОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Постоянный ток не может существовать в цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком.

Переменный же ток способен течь в цепи, содержащей конденсатор. В этом можно убедиться с помощью простого опыта. Пусть у нас имеются источники постоянного и переменного напряжений, причем постоянное напряжение на зажимах источника равно действующему значению переменного напряжения. Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания (рис. 37), соединенных по-

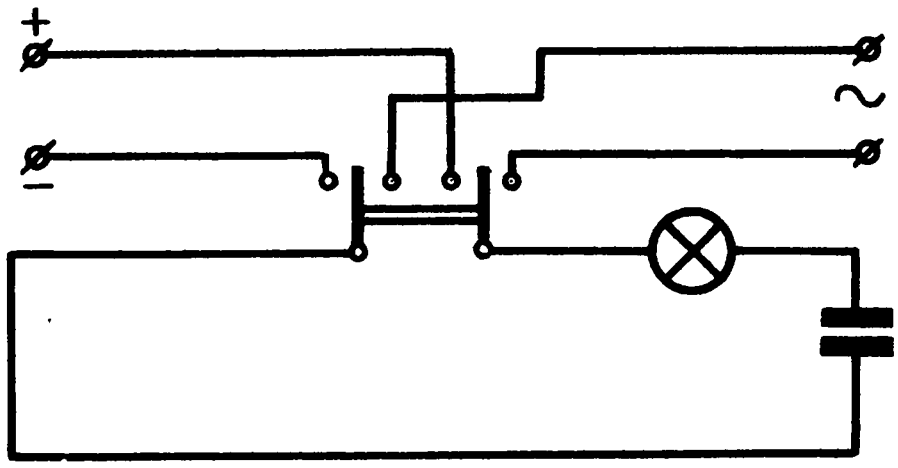


Рис. 37

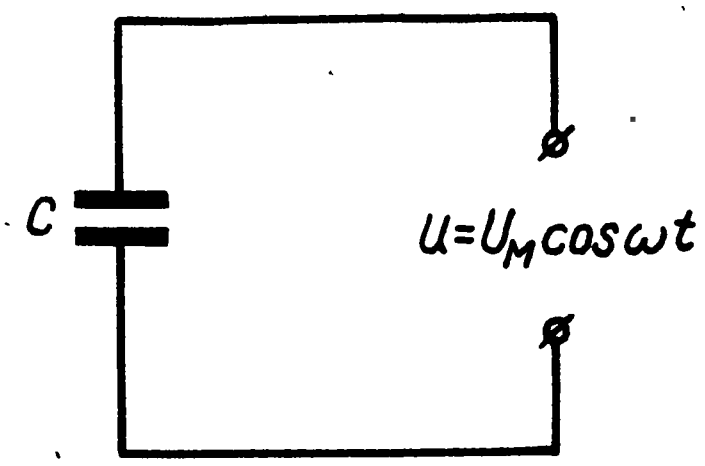


Рис. 38

следовательно. При включении постоянного напряжения лампа не светится. Но при включении переменного напряжения лампа загорается, если емкость конденсатора достаточно велика.

Как же переменный ток может течь по цепи, если она фактически разомкнута (между пластинами конденсатора заряды перемещаться не могут)? В сущности здесь происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, текущий в цепи при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

Найдем, как меняется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводов и обкладок конденсатора можно пренебречь (рис. 38).

Напряжение на конденсаторе

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

(где q — заряд верхней пластины) будет равно напряжению на концах цепи. Следовательно,

$$\frac{q}{C} = U_м \cos \omega t. \qquad (2.23)$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = CU_м \cos \omega t. \qquad (2.24)$$

Сила тока, представляющая собой производную заряда по времени, равна:

$$i = q' = -U_м C\omega \sin \omega t = U_м C\omega \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (2.25)$$

Следовательно, **колебания силы тока опережают колебания напряжения на конденсаторе на** $\pi/2$ (рис. 39). Это означает, что в момент, когда конденсатор начинает заряжаться, сила тока максимальна, а напряжение равно нулю. После того как напряжение достигает максимума, сила тока становится равной нулю и т. д.

Амплитуда силы тока равна

$$I_м = U_м \omega C. \qquad (2.26)$$

Если ввести обозначение

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \qquad (2.27)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = \frac{U}{X_C}. \qquad (2.28)$$

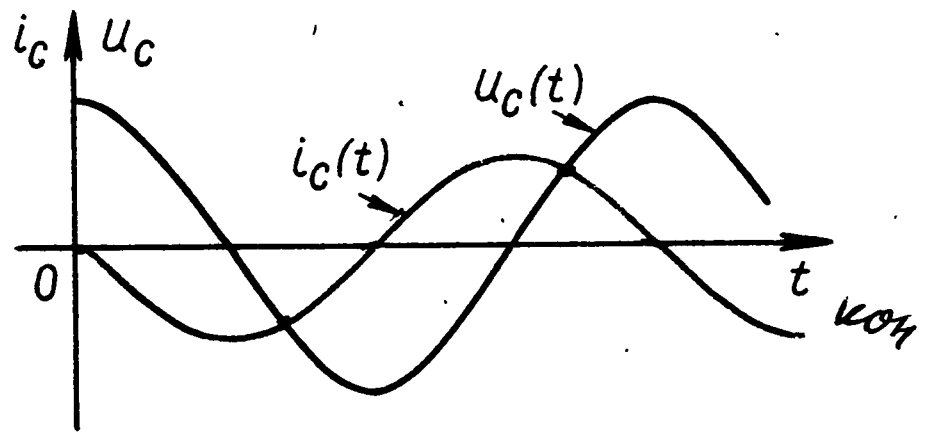


Рис. 39

Величину X_C, обратную произведению циклической частоты на емкость конденсатора, называют емкостным сопротивлением.

Сила тока (действующее значение) связана с напряжением на конденсаторе точно так же, как связаны сила тока и напряжение согласно закону Ома для постоянного тока. Это и позволяет рассматривать величину X_C как сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление).

Чем больше емкость конденсатора, тем больше согласно формуле (2.26) ток перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала лампы при увеличении емкости конденсатора.

В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_C. С ростом емкости оно уменьшается. Уменьшается оно и с увеличением частоты.

В заключение отметим, что на протяжении четверти периода, когда конденсатор заряжается до максимального напряжения, энергия поступает в цепь и запасается в конденсаторе в форме энергии электрического поля. В следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

§ 25. ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Индуктивность в цепи влияет на силу переменного тока. Это можно доказать с помощью простого опыта. Составим цепь из катушки с большой индуктивностью и электрической лампы накаливания (рис. 40). С помощью коммутатора можно подключить эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть равны между собой. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы переменного тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока.

Объясняется это явлением самоиндукции. Из IX класса вы знаете, что при подключении катушки к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Возникаю-

щее при нарастании силы тока вихревое электрическое поле тормозит движение электронов. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает максимального значения. Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигать значений, соответствующих данному мгновенному значению напряжения. Следовательно, максимальное значение силы переменного тока (его амплитуда) ограничивается индуктивностью цепи L и будет тем меньше, чем больше индуктивность.

Определим силу тока в цепи, содержащей катушку, активным сопротивлением которой можно пренебречь (рис. 41). Для этого предварительно найдем связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней.

Если сопротивление катушки равно нулю, то и напряженность электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна равняться нулю. Иначе сила тока согласно закону Ома была бы бесконечно большой. Равенство нулю напряженности поля оказывается возможным потому, что напряженность вихревого электрического поля $\vec{E}_i$, порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению напряженности кулоновского поля $\vec{E}_k$, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и проводах цепи.

Из равенства $\vec{E}_i = -\vec{E}_k$ следует, что **работа вихревого поля по перемещению единичного положительного заряда (т. е. ЭДС самоиндукции e_i) равна по модулю и противоположна по знаку работе кулоновского поля.** Учитывая, что работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, можно записать:

$$e_i = -u.$$

При изменении силы тока по гармоническому закону

$$i = I_м \cos \omega t$$

ЭДС самоиндукции равна

$$e_i = -Li' = L\omega I_м \sin \omega t. \qquad (2.29)$$

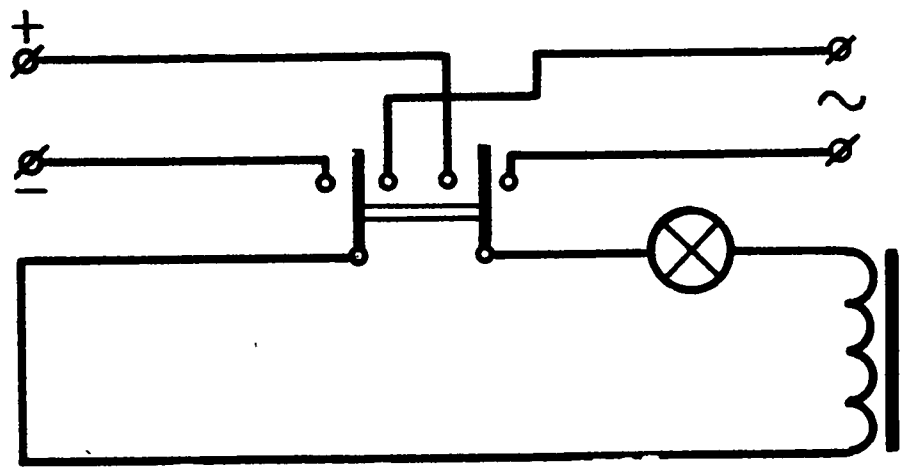


Рис. 40

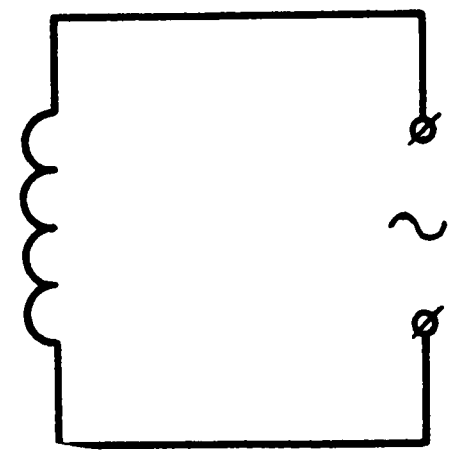


Рис. 41

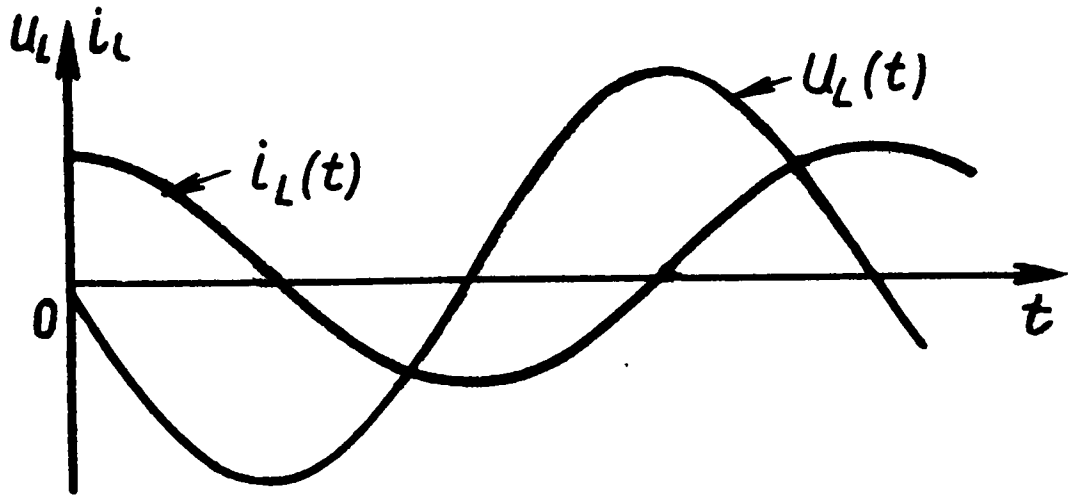


Рис. 42

Так как $u=-e_i$, то напряжение на концах катушки определится так:

$$u = -L\omega I_м \sin \omega t = L\omega I_м \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_м \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.30)$$

где $U_м = L\omega I_м$ — амплитуда напряжения по модулю.

Следовательно, **колебания напряжения на катушке опережают колебания силы тока на $\pi/2$, или,** что то же самое, **колебания силы тока отстают от колебаний напряжения на $\pi/2$.**

В момент, когда напряжение на катушке достигает максимума, сила тока равна нулю (рис. 42). В момент, когда напряжение становится равным нулю, сила тока максимальна по модулю.

Амплитуда силы тока в катушке равна

$$I_м = \frac{U_м}{\omega L}. \quad (2.31)$$

Если ввести обозначение

$$\omega L = X_L, \quad (2.32)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (2.33)$$

Величину X_L, равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют индуктивным сопротивлением.

Согласно формуле (2.33) действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения и индуктивным сопротивлением соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты. Постоянный ток вообще «не замечает» индуктивности катушки. При $\omega=0$ индуктивное сопротивление $X_L=0$. Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ЭДС самоиндукции и тем меньше амплитуда тока.

§ 26. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Рассмотрим теперь более общий случай электрической цепи, в которой последовательно соединены проводник с активным сопротивлением R и малой индуктивностью, катушка с большой индуктивностью L и малым активным сопротивлением и конденсатор емкостью C (рис. 43).

Чему равна амплитуда тока в такой цепи (колебательном контуре), если на ее концах поддерживается напряжение $u(t) = U_м \cos \omega t$? Мы видели, что при включении по отдельности в цепь активного сопротивления R, конденсатора емкостью C или катушки с индуктивностью L амплитуда силы тока определяется соответственно формулами (2.15), (2.26) и (2.31). Амплитуды же напряжений на активном сопротивлении, катушке индуктивности и конденсаторе связаны с амплитудой силы тока так:

$$U_{м,R} = I_м R, \quad U_{м,C} = I_м \frac{1}{\omega C}, \quad U_{м,L} = I_м \omega L.$$

В цепях постоянного тока напряжение на концах цепи равно сумме напряжений на отдельных последовательно соединенных участках цепи. Однако, если измерить результирующее напряжение на контуре и напряжения на отдельных элементах цепи, окажется, что напряжение на контуре (действующее значение) не равно сумме напряжений на отдельных элементах.

Почему это так? Дело в том, что гармонические колебания напряжения на различных участках цепи сдвинуты по фазе друг относительно друга.

Действительно, ток в любой момент времени одинаков во всех участках цепи. Это значит, что одинаковы амплитуды и фазы токов, протекающих по участкам с емкостным, индуктивным и активным сопротивлениями. Однако только на активном сопротивлении колебания напряжения и тока совпадают по фазе. На конденсаторе колебания напряжения отстают по фазе от колебаний тока на $\pi/2$ (см. § 24), а на катушке индуктивности колебания напряжения опережают колебания тока на $\pi/2$ (см. § 25).

Если учесть сдвиг фаз между складываемыми напряжениями, то окажется, что

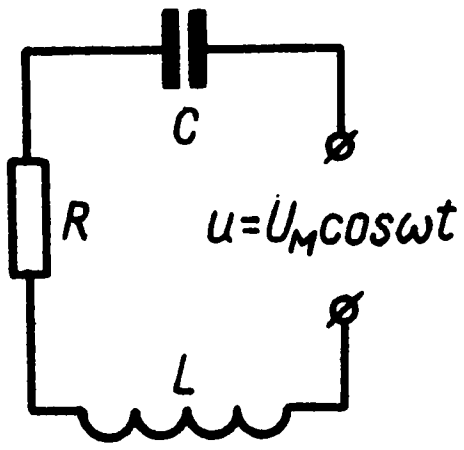


Рис. 43

$$U_м^2 = I_м^2 \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]. \qquad (2.34)$$

Для получения равенства (2.34) нужно уметь складывать колебания напряжений, сдвинутые по фазе друг относительно друга.

Проще всего выполнить сложение нескольких гармонических колебаний с помощью *векторных диаграмм*.

Идея метода основана на двух довольно простых положениях.

Во-первых, как вы знаете из § 7, *проекция вектора с модулем $x_{м,1}$, вращающегося с постоянной угловой скоростью, совершает гармонические колебания:*

$$x_1 = x_{м,1} \cos \omega t. \qquad (2.35)$$

Во-вторых, *при сложении двух векторов проекция суммарного вектора равна сумме проекций складываемых векторов.*

Пусть складываются два гармонических колебания одинаковой частоты, но различающиеся по амплитуде и фазе. Второе колебание сдвинуто по фазе относительно первого на φ_0 и определяется формулой

$$x_2 = x_{м,2} \cos (\omega t + \varphi_0). \qquad (2.36)$$

Каждое из этих колебаний можно рассматривать как проекцию соответствующего вектора́, вращающегося со скоростью ω, причем второй вектор образует с первым угол φ_0 (рис. 44). Суммарное смещение x, равное сумме смещений x_1 и x_2:

$$x = x_{м,1} \cos \omega t + x_{м,2} \cos (\omega t + \varphi_0), \qquad (2.37)$$

согласно второму положению представляет собой проекцию суммарного вектора, вращающегося со скоростью ω:

$$x = x_м \cos (\omega t + \varphi), \qquad (2.38)$$

где $x_м$ — модуль суммарного вектора, а φ — угол между этим вектором и вектором, проекция которого равна x_1. Этот угол определяет сдвиг фазы результирующего колебания относительно колебания x_1.

Графическое изображение гармонических колебаний и соотношений между гармонически колеблющимися величинами с помощью векторов называют векторной диаграммой.

Векторная диаграмма электрических колебаний в цепи, изображенной на рисунке 43, позволит нам получить соотношение (2.34) между амплитудой силы тока в этой цепи и амплитудой напряжения.

Так как сила тока одинакова во всех участках цепи, то построение векторной диаграммы удобно начать с вектора силы тока $\vec{I}_м$. Этот вектор изобразим в виде вертикальной стрелки (рис. 45). Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с силой тока. Поэтому вектор $\vec{U}_{м,R}$ должен совпадать по направлению с вектором $\vec{I}_м$. Его модуль равен $U_{м,R} = I_м R$.

Колебания напряжения на индуктивном сопротивлении опережают колебания силы тока на $\pi/2$, и соответствующий вектор $\vec{U}_{м,L}$ должен быть повернут относительно вектора $\vec{I}_м$ на $\pi/2$. Его модуль равен $U_{м,L} = I_м \omega L$. Если считать, что положительному сдвигу фаз соответствует поворот вектора против часовой стрелки, то вектор $\vec{U}_{м,L}$ следует повернуть налево. (Можно было бы, конечно, поступить и наоборот.)

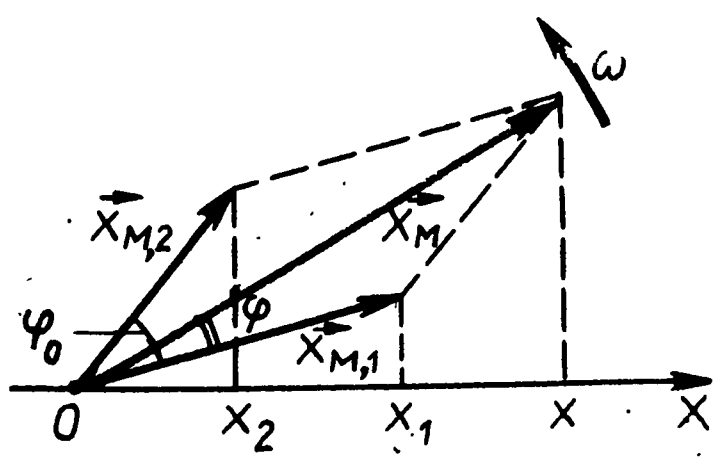


Рис. 44

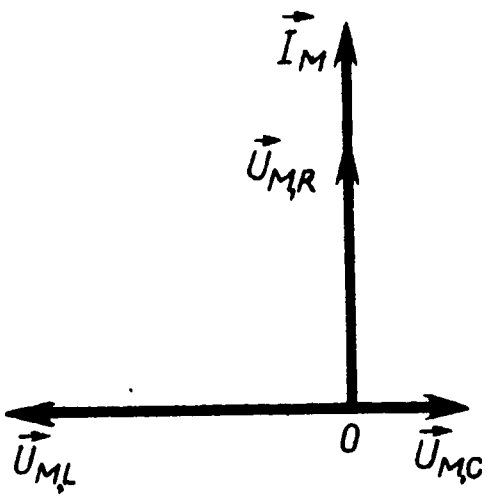


Рис. 45

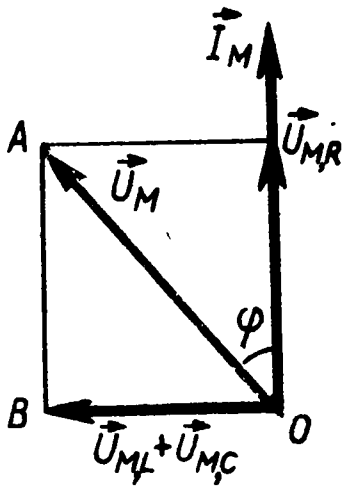


Рис. 46

Вектор напряжения на конденсаторе $\vec{U}_{м,C}$ отстает по фазе от вектора $\vec{I}_м$ на $\pi/2$ и поэтому повернут на этот угол относительно вектора $\vec{I}_м$ направо. Его модуль равен $U_{м,C} = I_м \frac{1}{\omega C}$.

Для нахождения вектора суммарного напряжения $\vec{U}_м$ нужно сложить три вектора: $\vec{U}_{м,R}$, $\vec{U}_{м,L}$ и $\vec{U}_{м,C}$. Вначале удобнее сложить два вектора $\vec{U}_{м,L}$ и $\vec{U}_{м,C}$ (рис. 46). Модуль этой суммы равен $I_м\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$, если $\omega L > \frac{1}{\omega C}$. Именно такой случай изображен на рисунке. После этого, сложив вектор $\vec{U}_{м,L} + \vec{U}_{м,C}$ с вектором $\vec{U}_{м,R}$, получим вектор $\vec{U}_м$, изображающий колебания напряжения в сети.

По теореме Пифагора (из треугольника AOB)

$$U_м^2 = U_{м,R}^2 + (U_{м,L} - U_{м,C})^2 = I_м^2 R^2 + I_м^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2,$$

или

$$U_м^2 = I_м^2 \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2\right].$$

Из равенства (2.34) можно легко найти амплитуду силы тока в цепи:

$$I_м = \frac{U_м}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (2.39)$$

Таким образом, благодаря сдвигу фаз между напряжениями на различных участках цепи полное сопротивление Z цепи, изображенной на рисунке 43, выражается так:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (2.40)$$

От амплитуд силы тока и напряжения можно перейти к действующим значениям этих величин. Они связаны друг с другом точно так же, как и амплитуды в формуле (2.39):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (2.41)$$

Это и есть закон Ома для переменного тока в цепи, изображенной на рисунке 43. Мгновенное значение силы тока меняется со временем гармонически:

$$i = I_м \cos(\omega t + \varphi), \qquad (2.42)$$

где φ — разность фаз между силой тока и напряжением в сети. Она зависит от частоты ω и параметров цепи R, L, C.

§ 27. МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мощность в цепи постоянного тока определяется во всех случаях произведением напряжения на силу тока:

$$P = UI. \tag{2.43}$$

Физический смысл этой формулы прост: так как напряжение U представляет собой работу электрического поля по перемещению единичного заряда, то произведение UI есть работа по перемещению заряда, протекающего через поперечное сечение проводника за единицу времени, т. е. мощность. Мощность электрического тока на данном участке цепи положительна, если энергия поступает к этому участку из остальной сети, и отрицательна, если энергия с этого участка возвращается в сеть. На протяжении очень малого интервала времени переменный ток можно считать неизменным. Поэтому мгновенная мощность в цепи переменного тока определяется такой же формулой:

$$p = ui. \tag{2.44}$$

Если напряжение на концах цепи меняется по гармоническому закону

$$u = U_м \cos \omega t,$$

то и сила тока будет меняться со временем гармонически с той же частотой, но в общем случае будет сдвинута по фазе относительно напряжения:

$$i = I_м \cos (\omega t + \varphi),$$

где φ — сдвиг фаз. Поэтому для мгновенной мощности можно записать:

$$p = ui = U_м I_м \cos \omega t \cdot \cos (\omega t + \varphi). \tag{2.45}$$

При этом мощность меняется со временем как по модулю, так и по знаку. В течение одной части периода энергия поступает к данному участку цепи ($p > 0$); но в течение другой части периода некоторая доля энергии вновь возвращается в цепь ($p < 0$).

Как правило, во всех случаях нам надо знать *среднюю мощность* на участке цепи за достаточно большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно определить среднюю мощность за один период (см. § 23).

Чтобы найти среднюю мощность за период, преобразуем сначала формулу (2.45) таким образом, чтобы выделить в ней член, не зависящий от времени. С этой целью воспользуемся известной формулой для произведения двух косинусов:

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos (\alpha - \beta) + \cos (\alpha + \beta)].$$

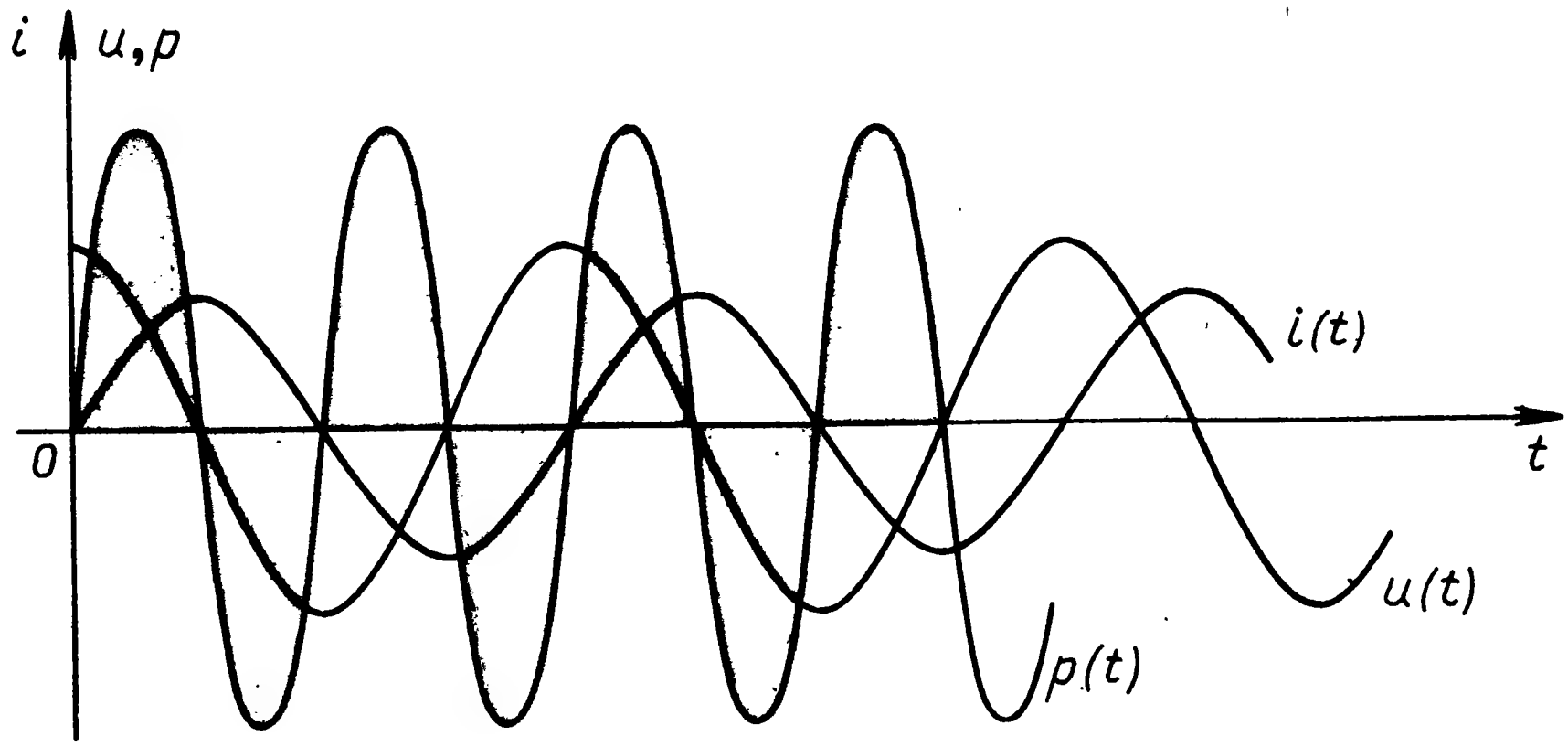


Рис. 47

В рассматриваемом случае $\alpha=\omega t$ и $\beta=\omega t+\varphi$. Поэтому $p=\frac{U_м I_м}{2}[\cos\varphi+\cos(2\omega t+\varphi)]=\frac{U_м I_м}{2}\cos\varphi+\frac{U_м I_м}{2}\cos(2\omega t+\varphi)$. Но среднее значение второго члена за период равно нулю (см. § 23). Следовательно, средняя мощность за период равна первому члену, не зависящему от времени:

$$\bar{p}=\frac{U_м I_м}{2}\cos\varphi.$$

Переходя к действующим значениям тока и напряжения, получим:

$$\bar{p}=\frac{U_м}{\sqrt{2}}\cdot\frac{I_м}{\sqrt{2}}\cos\varphi=UI\cos\varphi.$$

Эту величину называют просто мощностью переменного тока на участке цепи и обозначают через P:

$$P=UI\cos\varphi. \qquad (2.46)$$

Таким образом, мощность переменного тока на участке цепи определяется именно действующими значениями тока и напряжения. Она зависит также от сдвига фаз φ между напряжением и током. Множитель $\cos\varphi$ в (2.46) называется *коэффициентом мощности.*

В случае, когда $\varphi=\pm\frac{\pi}{2}$, энергия, поступающая к участку цепи за период, равна нулю, хотя в цепи и течет ток. Так будет, в частности, если цепь содержит одну лишь индуктивность или емкость.

Как же средняя мощность может оказаться равной нулю при наличии тока в цепи? Это поясняют приведенные на рисунке 47 графики изменения со временем напряжения, тока и мгновенной мощности при $\varphi=-\frac{\pi}{2}$ (чисто индуктивное сопротивление участка цепи). График зависимости мгновенной мощности от времени

можно получить, перемножая значения тока и напряжения в каждый момент времени. Из этого графика видно, что в течение одной четверти периода мощность положительна и энергия поступает к данному участку цепи; но в течение следующей четверти периода мощность отрицательна, и данный участок отдает без потерь обратно в сеть полученную ранее энергию. Поступающая в течение четверти периода энергия запасается в магнитном поле тока, а затем без потерь возвращается в сеть.

Лишь при наличии активного сопротивления в цепи, не содержащей движущихся проводников, электромагнитная энергия превращается во внутреннюю энергию проводника, который нагревается. Обратного превращения внутренней энергии в электромагнитную на активном сопротивлении уже не происходит.

При проектировании цепей переменного тока нужно добиваться, чтобы $\cos \varphi$ не был мал. Иначе значительная часть энергии будет циркулировать по проводам от генератора к потребителям и обратно. Так как провода обладают активным сопротивлением, то при этом энергия растрачивается на нагревание проводов.

Неблагоприятные условия для потребления энергии возникают при включении в сеть электродвигателей, так как их обмотка имеет малое активное сопротивление и большую индуктивность. Для увеличения $\cos \varphi$ в сетях питания предприятий с большим числом электродвигателей включают специальные компенсирующие конденсаторы. Нужно также следить, чтобы электродвигатели не работали вхолостую или с недогрузкой. Это уменьшает коэффициент мощности всей цепи. Повышение $\cos \varphi$ является важной народнохозяйственной задачей, так как позволяет с максимальной отдачей использовать генераторы электростанций и снизить потери энергии. Это достигается правильным проектированием электрических цепей. Запрещается использовать устройства с $\cos \varphi < 0{,}85$.

?

1. По каким формулам вычисляются емкостное и индуктивное сопротивления?
2. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?
3. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на катушке индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь?
4. Какое влияние оказывает сдвиг фаз между током и напряжением на мощность в цепи переменного тока?

§ 28. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

При изучении вынужденных механических колебаний мы познакомились с важным явлением — *резонансом*. Резонанс наблюдается в том случае, когда собственная частота колебаний системы совпадает с частотой внешней силы. При малом трении происходит резкое увеличение амплитуды установившихся вынужденных колебаний.

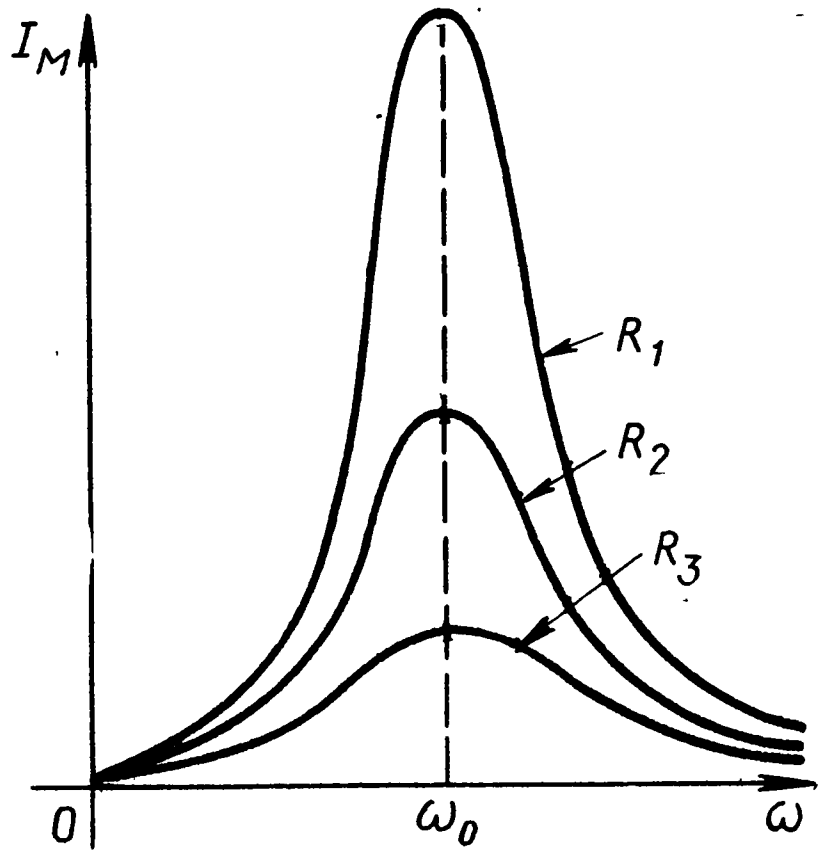


Рис. 48

Совпадение законов механических и электромагнитных колебаний сразу же позволяет сделать заключение о возможности резонанса в электрической цепи, если эта цепь представляет собой колебательный контур, обладающий определенной собственной частотой колебаний.

Амплитуда тока при вынужденных колебаниях в контуре, совершающихся под действием внешнего гармонически изменяющегося напряжения, как уже говорилось ранее, определяется формулой (2.39).

При фиксированном напряжении и заданных значениях R, L и C сила тока достигает максимума при частоте ω, удовлетворяющей соотношению

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}. \qquad (2.47)$$

Знаменатель в формуле (2.39) становится при этом минимальным, и амплитуда силы тока достигает максимального значения

$$I_м = \frac{U_м}{R}. \qquad (2.48)$$

Эта амплитуда особенно велика при малом R.

Из уравнения (2.47) можно определить значение циклической частоты переменного тока, при которой сила тока максимальна:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \qquad (2.49)$$

Эта частота совпадает с частотой свободных колебаний в контуре с малым активным сопротивлением (см. § 20).

Резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний тока в колебательном контуре с малым активным сопротивлением происходит при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура. В этом состоит явление резонанса в электрическом колебательном контуре.

Резонанс выражен тем отчетливее, чем меньше энергетические потери в цепи, т. е. чем меньше сопротивление R. При $R \to 0$ резонансное значение тока неограниченно возрастает: $I_{рез} \to \infty$. Наоборот, с увеличением R максимальное значение тока уменьшается и при больших R говорить о резонансе уже не имеет смысла. Зависимость амплитуды силы тока от частоты при различных сопротивлениях показана на рисунке 48 ($R_1 < R_2 < R_3$).

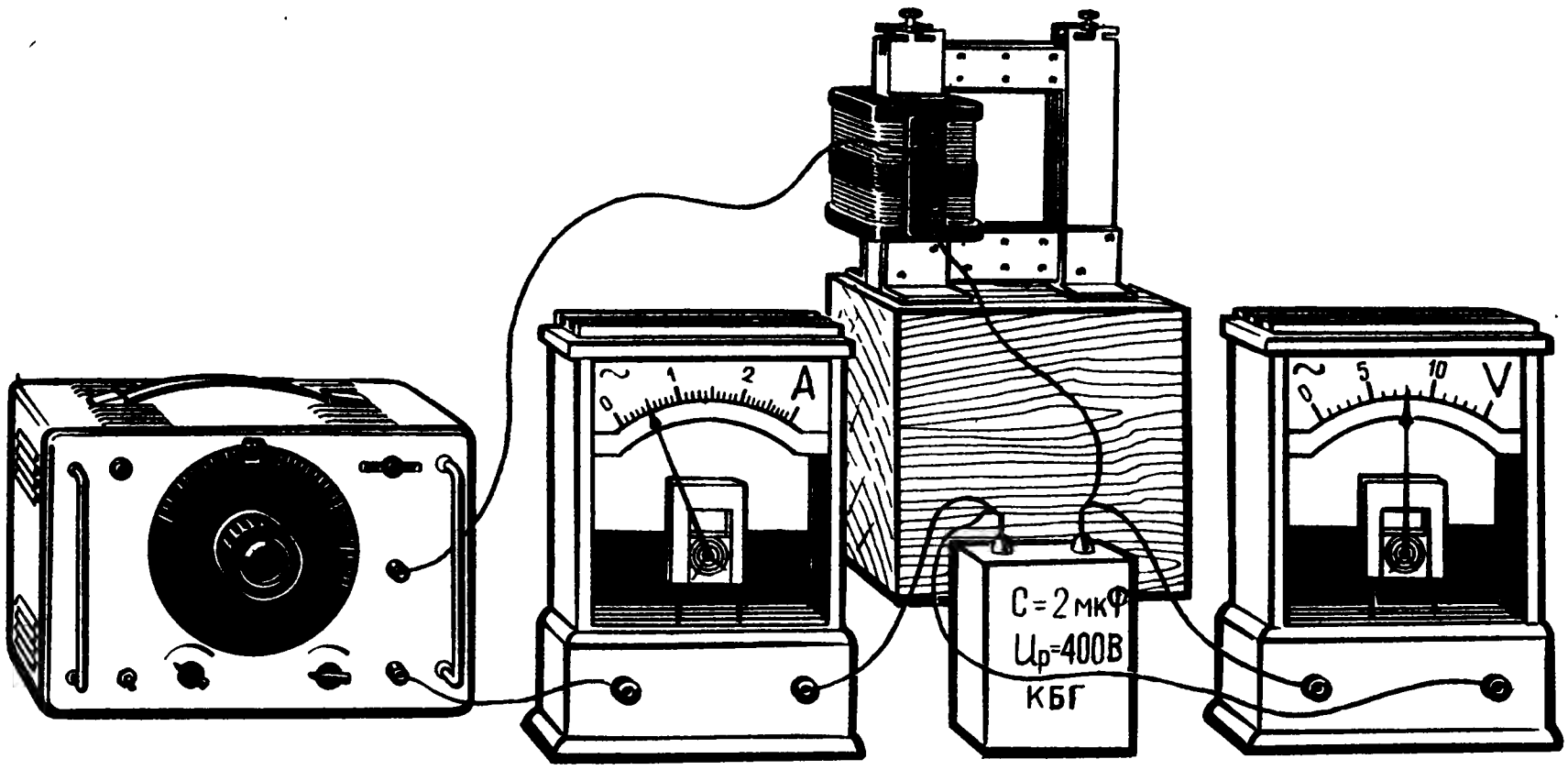


Рис. 49

Одновременно с ростом силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения становятся одинаковыми и во много раз превосходят внешнее напряжение.

Действительно,

$$U_{м,\,C,рез} = I_{м,\,рез}\,\frac{1}{\omega_0 C} = I_{м,\,рез}\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

$$U_{м,\,L,\,рез} = I_{м,\,рез}\,\omega_0 L = I_{м,\,рез}\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Внешнее напряжение связано с резонансным током так:

$$U_м = I_{м,\,рез} R.$$

Если $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$, то

$$U_{м,\,C,\,рез} = U_{м,\,L,\,рез} \gg U_м.$$

При резонансе сдвиг фаз между током и напряжением становится равным нулю.

Действительно, колебания напряжения на катушке индуктивности и конденсаторе всегда происходят в противофазе. Резонансные амплитуды этих напряжений одинаковы. В результате напряжения на катушке и конденсаторе полностью компенсируют друг друга ($u_L = -u_C$), и падение напряжения происходит только на активном сопротивлении.

Согласно выражению для мощности (2.46) равенство нулю сдвига фаз между напряжением и током при резонансе обеспечивает оптимальные условия для поступления энергии от источника переменного напряжения в цепь. Здесь полная аналогия с механическими колебаниями: при резонансе внешняя сила (аналог напряжения в цепи) совпадает по фазе со скоростью (аналог силы тока).

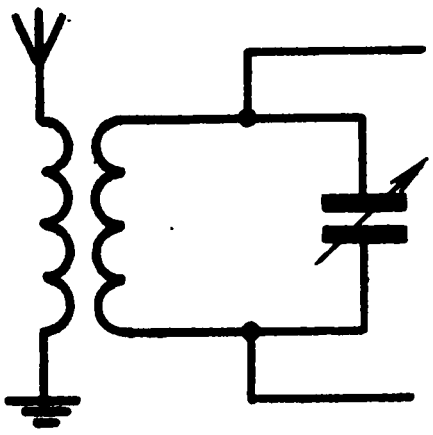


Рис. 50

Может возникнуть вопрос: откуда система получает при резонансе бóльшую энергию? Здесь положение точно такое же, как и в случае механического резонанса. Не сразу после включения внешнего напряжения в цепи установится резонансное значение силы тока. Установление колебаний в контуре происходит постепенно. Чем меньше R, тем больше времени пройдет, пока амплитуда тока достигнет своего максимального значения за счет энергии, поступающей от источника.

Для наблюдения резонанса в электрической цепи собирают установку по схеме, изображенной на рисунке 49. В ней используется внешний источник переменного напряжения регулируемой частоты. Увеличивая постепенно частоту колебаний внешнего напряжения, можно наблюдать, как изменяется сила тока в цепи, измеряемая амперметром, и напряжение на конденсаторе или катушке индуктивности, измеряемое вольтметром. Эти величины возрастают при резонансе в десятки или даже сотни раз.

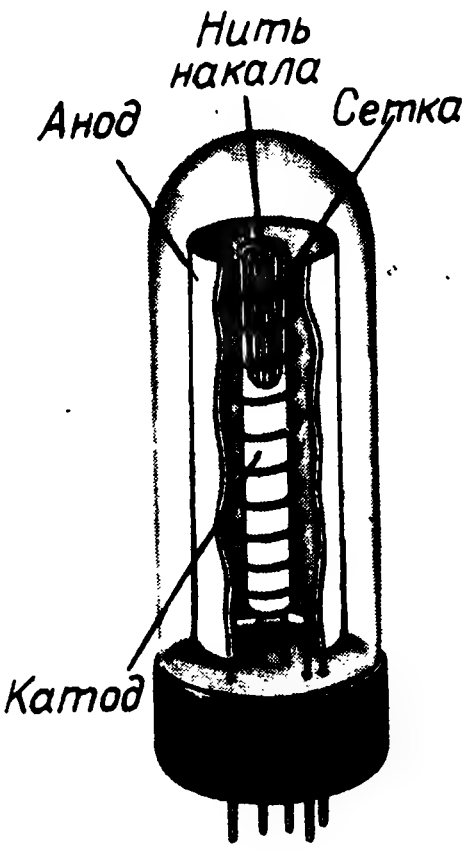


Рис. 51

Явление электрического резонанса используется, в частности, при осуществлении радиосвязи. Радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприемника переменные токи различных частот (рис. 50), так как каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной индуктивно связан колебательный контур. Вследствие электромагнитной индукции в контурной катушке возникают переменные ЭДС соответствующих частот и вынужденные колебания тока этих же частот. Но только при резонансе колебания тока в контуре и напряжения на контуре будут значительными. Имея это в виду, говорят, что из колебаний всех частот, возбужденных в антенне, контур выделяет только колебания, частота которых равна собственной частоте контура. Настройка контура на нужную частоту ω_0 обычно осуществляется путем изменения емкости конденсатора. В этом состоит настройка радиоприемника на определенную радиостанцию.

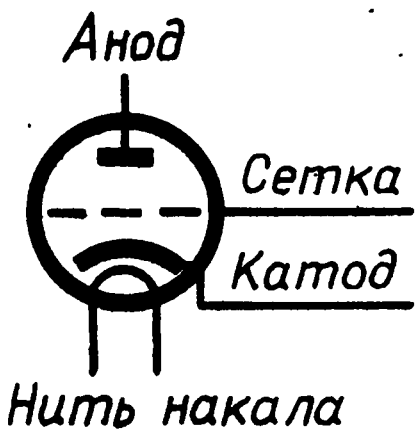


Рис. 52

В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может принести большой вред. Если цепь не рассчитана на работу в усло-

виях резонанса, то возникновение резонанса приведет к аварии. Чрезмерно большие токи могут перегреть провода. Большие напряжения приведут к пробою изоляции. Такого рода аварии нередко случались в прошлом веке, когда плохо представляли себе законы электрических колебаний и не умели правильно рассчитывать электрические цепи.

§ 29. ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА

Прежде чем перейти к изучению еще одного вида электрических колебаний — *автоколебаний,* нам нужно познакомиться с устройством трехэлектродной электронной лампы — *триода.*

В курсе физики для IX класса было рассказано об устройстве и действии диода — двухэлектродной электронной лампы: два электрода такой лампы — катод и анод — помещены в баллоне, из которого выкачан воздух. Нагреваемый током катод испускает электроны, и вокруг него образуется облако отрицательного пространственного заряда. Под действием электрического поля в лампе, направленного от анода к катоду, электроны из этого облака устремляются к аноду, образуя электрический ток.

Триод имеет еще один дополнительный электрод — сетку. Она помещается между катодом и анодом гораздо ближе к катоду. Само название «сетка» указывает на то, что этот электрод не сплошной и может пропускать электроны, летящие от катода к аноду. В большинстве электронных ламп сетка представляет собой укрепленный на стойках проволочный каркас в виде круглой или овальной винтовой линии (рис. 51). Условное обозначение триода показано на рисунке 52.

Если между сеткой и катодом создать разность потенциалов (сеточное напряжение), то между этими электродами возникнет электрическое поле, сильно влияющее на количество электронов, достигающих анода, т. е. на силу тока, текущего через лампу (силу анодного тока). **Главная особенность триода состоит в возможности управления анодным током с помощью изменения разности потенциалов между сеткой и катодом.**

На рисунке 53 показан график зависимости анодного тока I_a от сеточного напряжения U_c при неизменном анодном напряжении (разности потенциалов между анодом и катодом) U_a. Этот график называют *сеточной характеристикой* лампы. Она может быть получена на опыте, схема которого изображена на рисунке 54.

Из сеточной характеристики видно, что увеличение сеточного потенциала (относительно катода) ведет к увеличению анодного тока. При уменьшении потенциала сетки сила анодного тока, напротив, уменьшается. Анодный ток прекращается (лампа запирается), если потенциал на сетке уменьшить до некоторого значения $U_з$. Этот потенциал, называемый *потенциалом запирания* лампы, зависит от устройства лампы и от анодного напряжения.

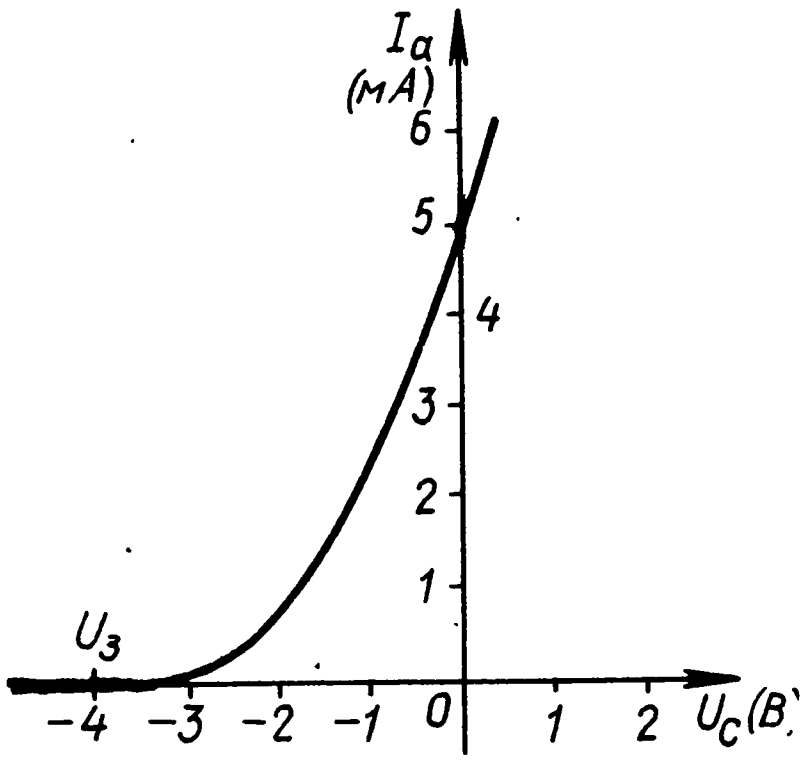


Рис. 53

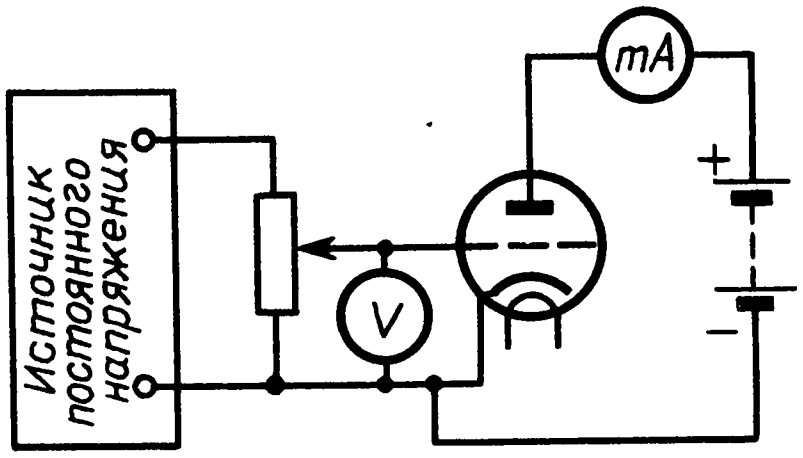


Рис. 54

Объясняется это следующим образом. Электрическое поле положительно заряженной сетки действует на электроны облака пространственного заряда с силой, направленной к аноду. В результате электронное облако рассасывается. Поэтому большая часть электронов, испускаемых катодом, пролетает между витками сетки; анодный ток будет большим. При отрицательном потенциале сетки электрическое поле между сеткой и катодом имеет обратное направление. При этом объемный отрицательный заряд вокруг катода увеличивается, и меньшая часть электронов, испускаемых катодом, пролетает между витками сетки к аноду. Анодный ток будет меньшим.

Из-за того, что сетка расположена на малом расстоянии от катода, изменение сеточного напряжения на ΔU_c гораздо сильнее меняет напряженность электрического поля, действующего на электронное облако у катода, чем изменение анодного напряжения ΔU_a на такую же величину. Соответственно **одинаковые изменения анодного тока ΔI_a достигаются при гораздо меньших (в несколько десятков раз) изменениях сеточного напряжения, чем анодного.** В этом состоит самое важное свойство триода, позволяющее использовать его в различных радиотехнических устройствах: усилителях, ламповых генераторах и т. д.

§ 30. ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Вынужденные электрические колебания, которые мы до сих пор рассматривали, возникают под действием переменного напряжения, вырабатываемого генераторами на электростанциях.

Однако такие генераторы не способны создавать применяемые в радиотехнике колебания высокой частоты, так как для этого потребовалась бы чрезмерно большая скорость вращения роторов.

Колебания высокой частоты получают с помощью других устройств, одним из которых является так называемый *ламповый генератор*. Он назван так потому, что одной из его основных частей является трехэлектродная электронная лампа — триод.

Ламповый генератор представляет собой автоколебательную систему, в которой вырабатываются незатухающие колебания за счет энергии источника постоянного напряжения, например батареи гальванических элементов или выпрямителя. В этом отношении ламповый генератор подобен часам, в которых незатухающие колебания маятника поддерживаются за счет энергии поднятой гири или сжатой пружины.

Ламповый генератор содержит колебательный контур, состоящий из катушки с индуктивностью L и конденсатора емкости C (рис. 55). Известно, что если конденсатор зарядить, то в контуре возникнут затухающие колебания. Чтобы колебания не затухали, нужно компенсировать потери энергии за каждый период. Следовательно, энергия от источника постоянного напряжения должна периодически поступать в контур.

Для этого ток в анодной цепи лампы должен совершать колебания, совпадающие по фазе с колебаниями напряжения на контуре. Тогда коэффициент мощности для анодной цепи равен единице ($\cos \varphi = 1$), и условия для передачи энергии контуру оптимальны.

Периодическое же изменение анодного тока может быть достигнуто за счет периодического изменения потенциала сетки относительно катода. А для этого колебания в самом контуре должны управлять потенциалом сетки: необходима, как говорят, *обратная связь*. Колебания анодного тока должны поддерживать колебания в контуре, а колебания в контуре, в свою очередь, должны управлять анодным током (у часов с маятником обратная связь осуществляется с помощью анкерного механизма).

Обратная связь в ламповом генераторе, схема которого приведена на рисунке 55, называется *индуктивной*. В цепь сетки включена катушка L_c, индуктивно связанная с катушкой колебательного контура.

Сила тока в контурной катушке L отстает по фазе на $\pi/2$ относительно колебаний напряжения на контуре (см. § 25). ЭДС индукции в катушке L_c (а значит, и напряжение на сетке) согласно закону электромагнитной индукции сдвинута по фазе относительно колебаний силы тока в катушке контура тоже на $\pi/2$. В зависимости от порядка подключения концов катушки L_c к сетке и катоду лампы этот сдвиг фазы напряжения на сетке равен либо $\pi/2$, либо $-\pi/2$. В первом случае колебания напряжения на сетке совпадают по фазе с колебаниями напряжения на контуре. Следовательно, и колебания анодного тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения на контуре. Это и является необходимым условием для работы генератора. При переключении концов катушки L_c колебания анодного тока окажутся сдвинутыми по фазе относительно колебаний напряжения

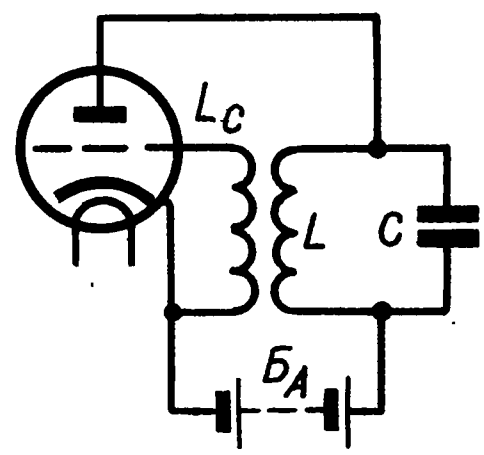


Рис. 55

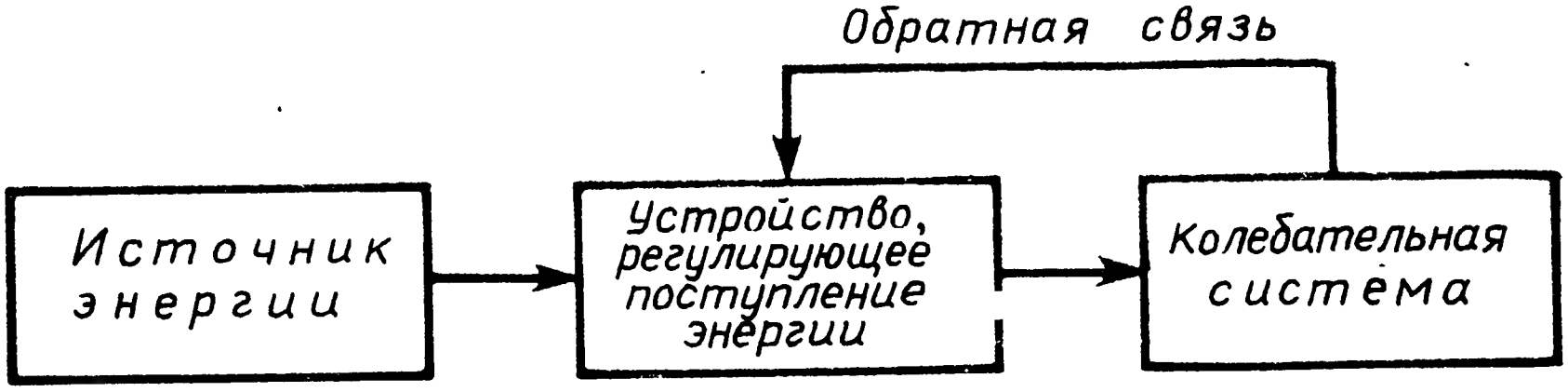


Рис. 56

на контуре на π. В этих условиях генератор работать не будет. После замыкания анодной цепи конденсатор заряжается и в контуре начинаются колебания. Их амплитуда нарастает до тех пор, пока потери энергии в контуре не будут в точности компенсироваться поступлением энергии из анодной цепи лампы.

Частота колебаний в контуре определяется индуктивностью L катушки и емкостью C конденсатора согласно формуле Томсона:

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

При малых L и C частота колебаний велика.

Обнаружить возникновение колебаний в генераторе (возбуждение генератора) можно с помощью осциллографа, подав на его вертикально отклоняющие пластины напряжения с конденсатора.

Ламповые генераторы имеются на всех передающих радиостанциях и входят в состав многих других радиотехнических устройств.

На примере лампового генератора можно отчетливо выделить основные элементы, характерные для многих автоколебательных систем (рис. 56):

1) источник энергии, за счет которого поддерживаются незатухающие колебания (в ламповом генераторе это источник постоянного напряжения);

2) устройство, регулирующее поступление энергии от источника — «клапан» (в ламповом генераторе роль «клапана» играет триод);

3) колебательная система, т. е. та часть автоколебательной системы, в которой непосредственно происходят колебания (в ламповом генераторе это колебательный контур);

4) обратная связь, с помощью которой колебательная система управляет «клапаном» (в ламповом генераторе это индуктивная связь катушки контура с катушкой в цепи сетки).

* * *

На этом мы заканчиваем изучение механических и электрических колебаний. Замечательна тождественность общего характера процессов различной природы, тождественность математических уравнений, которые их описывают. Эта тождественность, как мы видели, сильно облегчает изучение колебаний.

?

1. Может ли амплитуда силы тока при резонансе в колебательном контуре с активным сопротивлением R превысить силу постоянного тока в цепи с таким же активным сопротивлением и постоянным напряжением, равным амплитуде переменного напряжения?
2. Какова роль сетки в триоде?
3. Как осуществляется обратная связь в ламповом генераторе?
4. Укажите (на примере лампового генератора) основные элементы автоколебательной системы.

УПРАЖНЕНИЕ 2

1. После того как конденсатору колебательного контура был сообщен заряд $q=10^{-5}$ Кл, в контуре возникли затухающие колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре к тому времени, когда колебания в нем полностью затухнут? Емкость конденсатора $C=0{,}01$ мкФ.
2. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью $L=0{,}003$ Г и плоского конденсатора, состоящего из двух пластин в виде дисков радиуса $r=1{,}2$ см, расположенных на расстоянии $d=0{,}3$ мм друг от друга. Определить период свободных колебаний в контуре. Каков будет период, если пространство между обкладками конденсатора заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=4$?
3. В каких пределах должна изменяться индуктивность катушки колебательного контура, чтобы частота колебаний изменялась от 400 до 500 Гц? Емкость конденсатора 10 мкФ.
4. Найти амплитуду ЭДС, наводимой в рамке, вращающейся в однородном магнитном поле, если частота вращения составляет 50 об/с, площадь рамки 100 см^2 и магнитная индукция 0,2 Т.
5. В проволочной рамке с площадью сечения $S=100$ см^2 возбуждается ЭДС индукции с амплитудой $\mathcal{E}_м=1{,}4$ В. Число витков в рамке $N=200$. Рамка вращается с постоянной угловой скоростью в однородном магнитном поле, индукция которого $B=0{,}15$ Т. В начальный момент плоскость рамки перпендикулярна вектору $\vec{B}$. Определить ЭДС индукции e в рамке через время $t=0{,}1$ с после начала ее движения.
6. Катушка с индуктивностью $L=0{,}08$ Г присоединена к источнику переменного напряжения с частотой $\nu=1000$ Гц. Действующее значение напряжения $U=100$ В. Определить амплитуду тока $I_м$ в цепи.
7. Определить полное сопротивление цепи, состоящей из включенных последовательно конденсатора емкостью 1 мкФ и катушки с индуктивностью 0,05 Г при частоте тока 1000 Гц. Активным сопротивлением можно пренебречь.
8. Определить сдвиг фаз между током и напряжением в электрической цепи, если генератор отдает в цепь мощность 8 кВт, амплитуда тока в цепи 100 А и амплитуда напряжения на зажимах генератора 200 В.
9. Соленоид с железным сердечником, имеющий индуктивность 2 Г и активное сопротивление обмотки 100 Ом, включен сначала в сеть постоянного тока с напряжением 20 В, а затем в сеть переменного тока с действующим напряжением 20 В и частотой 400 Гц. Определить ток, текущий через соленоид в первом и втором случаях.
10. Построить векторную диаграмму цепи переменного тока, изображенной на рисунке 43 для случая резонанса.
11. Резонанс в колебательном контуре с конденсатором емкостью $C_1=10^{-6}$ Ф наступает при частоте колебаний $\nu_1=400$ Гц. Когда параллельно конденсатору с емкостью C_1 подключают другой конденсатор емкостью C_2, то резонансная частота становится равной $\nu_2=100$ Гц. Определить емкость C_2. Активным сопротивлением контура пренебречь.

Глава III

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 31. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая энергия обладает неоспоримыми преимуществами перед всеми другими видами энергии. Ее можно передавать по проводам на огромные расстояния со сравнительно малыми потерями, ее удобно распределять между потребителями и, главное, эту энергию с помощью достаточно простых устройств легко превратить в любые другие формы: механическую, внутреннюю (тепло), энергию света и т. д.

Переменный ток имеет то преимущество перед постоянным, что напряжение и силу тока можно в очень широких пределах преобразовывать (трансформировать) почти без потерь энергии. Такие преобразования необходимы во многих электро- и радиотехнических устройствах. Но особенно большая необходимость в трансформации напряжения и тока возникает при передаче электроэнергии на большие расстояния.

Электрический ток вырабатывается в *генераторах* — устройствах, преобразующих энергию того или иного вида в электрическую энергию. К генераторам относятся гальванические элементы, электростатические машины, термобатареи [1], солнечные батареи, применяемые на космических кораблях, и т. п. Исследуются возможности создания принципиально новых типов генераторов. Например, разрабатываются так называемые топливные элементы, в которых энергия, освобождающаяся в результате реакции водорода с кислородом, непосредственно превращается в электрическую. Ведутся успешные работы по созданию магнитогидродинамических генераторов (МГД-генераторы), в которых происходит прямое превращение механической энергии струи раскаленного ионизированного газа (плазмы), движущейся в магнитном поле, в электрическую энергию.

Область применения каждого из перечисленных видов генераторов электроэнергии определяется их характеристиками. Так, электростатические машины создают высокую разность потенциалов, но не способны создать в цепи сколько-нибудь значительную силу тока. Гальванические элементы могут дать большой ток, но продолжительность их действия невелика.

Преобладающую роль в наше время играют *электромеханические индукционные генераторы* переменного тока. В этих генера-

[1] В термобатареях используется свойство двух контактов разнородных материалов создавать ЭДС за счет разности температур этих контактов.

торах механическая энергия превращается в электрическую. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции. Такие генераторы имеют сравнительно простое устройство и позволяют получать большие токи при достаточно высоком напряжении.

В дальнейшем, говоря о генераторах, мы будем иметь в виду именно индукционные электромеханические генераторы.

§ 32. ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Принцип действия генератора переменного тока уже был рассмотрен в § 21.

В настоящее время имеется много различных типов индукционных генераторов. Но все они состоят из одних и тех же основных частей. Это, во-первых, электромагнит или постоянный магнит, создающий магнитное поле, и, во-вторых, обмотка, в которой индуцируется переменная ЭДС (в рассмотренной модели генератора это вращающаяся рамка). Так как ЭДС, наводимые в последовательно соединенных витках, складываются, то амплитуда ЭДС индукции в рамке пропорциональна числу витков в ней. Она пропорциональна также амплитуде переменного магнитного потока $\Phi_м = BS$ через каждый виток (см. § 21).

Для получения большого магнитного потока в генераторах применяют почти замкнутую магнитную систему, состоящую из двух сердечников, сделанных из специальной электротехнической стали. Обмотки, создающие магнитное поле, размещены в пазах одного из сердечников, а обмотки, в которых индуцируется ЭДС,— в пазах другого. Один из сердечников (обычно внутрен-

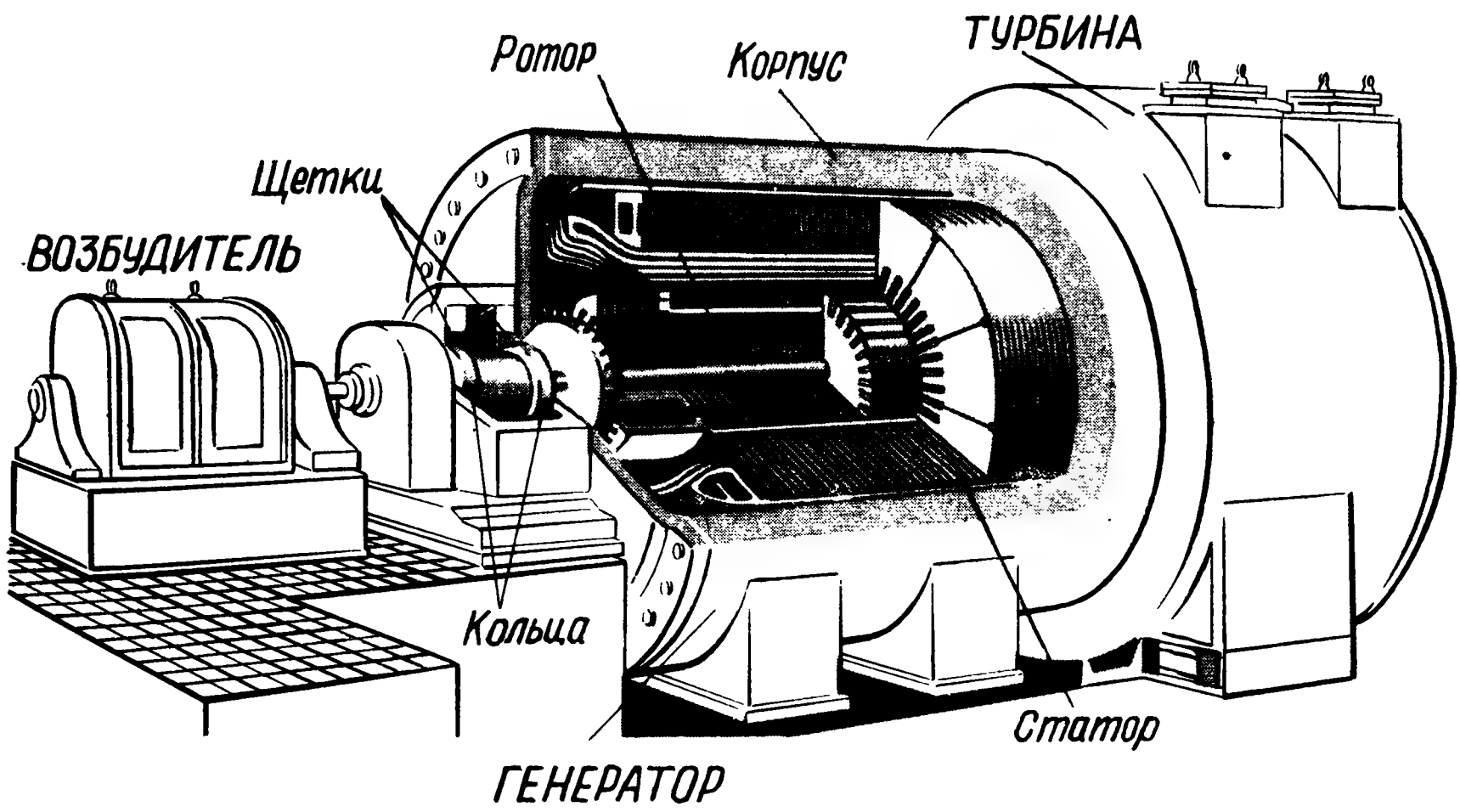


Рис. 57

ний) вместе со своей обмоткой вращается вокруг горизонтальной или вертикальной оси. Поэтому он называется *ротором.* Неподвижный сердечник с его обмоткой называют *статором.* Зазор между сердечниками статора и ротора делают как можно меньшим. Этим обеспечивается наибольшее значение потока магнитной индукции.

Так как стальные сердечники являются проводниками, то при работе генератора в них наводятся паразитные вихревые токи, которые бесполезно нагревают сердечники, уменьшая КПД генератора. Для ослабления вихревых токов и уменьшения соответствующих потерь энергии сердечники генераторов набирают из отдельных тонких изолированных друг от друга стальных пластин.

В изображенной на рисунке 26 модели генератора вращается проволочная рамка, которая является ротором (правда, без железного сердечника). Магнитное поле создает неподвижный постоянный магнит. Разумеется, можно было бы поступить и наоборот — вращать магнит, а рамку оставить неподвижной.

В больших промышленных генераторах вращается именно электромагнит, который является ротором, в то время как обмотки, в которых наводится ЭДС, уложены в пазах статора и остаются неподвижными. Дело в том, что подводить ток к ротору или отводить его из обмотки ротора во внешнюю цепь приходится при помощи скользящих контактов. Для этого ротор снабжается *контактными кольцами,* присоединенными к концам его обмотки (рис. 57). Неподвижные пластины — *щетки,* прижатые к кольцам, осуществляют связь обмотки ротора с внешней цепью. Сила тока в обмотках электромагнита, создающего магнитное поле, значительно меньше силы тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь. Поэтому генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту. Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем), расположенным на том же валу.

В маломощных генераторах магнитное поле создается вращающимся постоянным магнитом. В таком случае кольца и щетки вообще не нужны.

Появление ЭДС в неподвижных обмотках статора объясняется возникновением в них вихревого электрического поля, порожденного изменением магнитного потока при вращении ротора.

Если в однородном магнитном поле вращается плоская рамка, то период генерируемой ЭДС будет равен периоду вращения рамки. Это не всегда удобно. Например, для получения переменного тока с частотой 50 Гц рамка должна в однородном магнитном поле совершать 50 об/с, т. е. 3000 об/мин. Такое же число оборотов потребуется и в случае вращения двухполюсного постоянного магнита или двухполюсного электромагнита. Действительно, период изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки статора, должен быть равен 1/50 с, а для этого

каждый из полюсов ротора должен проходить мимо витков 50 раз в секунду. Скорость вращения можно уменьшить, если использовать в качестве ротора электромагнит, имеющий 4, 6, 8, ... полюсов. Тогда период генерируемого тока будет соответствовать времени, необходимому для поворота ротора соответственно на 1/2, 1/3, 1/4... доли окружности. Следовательно, ротор можно вращать в 2, 3, 4, ... раза медленнее. Это важно, когда генератор приводится во вращение тихоходными двигателями, например гидравлическими турбинами. Так, роторы генераторов Угличской ГЭС на Волге делают 62,5 об/мин и имеют 48 пар полюсов.

§ 33. ТРАНСФОРМАТОР

ЭДС мощных генераторов электростанций обычно довольно велика. Между тем практическое использование электроэнергии требует чаще всего не слишком высоких напряжений, а передача энергии, наоборот, очень высоких.

Преобразование переменного тока определенной частоты, при котором напряжение увеличивается или уменьшается в несколько раз практически без потери мощности, осуществляется с помощью *трансформаторов.*

Впервые трансформаторы были использованы в 1878 г. русским ученым П. Н. Яблочковым для питания изобретенных им «электрических свечей» — нового в то время источника света. Идея П. Н. Яблочкова была развита сотрудником Московского университета И. Ф. Усагиным, сконструировавшим усовершенствованные трансформаторы.

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, на который надеты две (иногда и более) катушки с проволочными обмотками (рис. 58). Одна из обмоток, называемая *первичной,* подключается к источнику переменного напряжения. Вторая обмотка, к которой присоединяют «нагрузку», т. е. приборы и устройства, потребляющие электроэнергию, называется *вторичной.* Схема устройства трансформатора с двумя обмотками приведена на рисунке 59, а его условное обозначение—на рисунке 60.

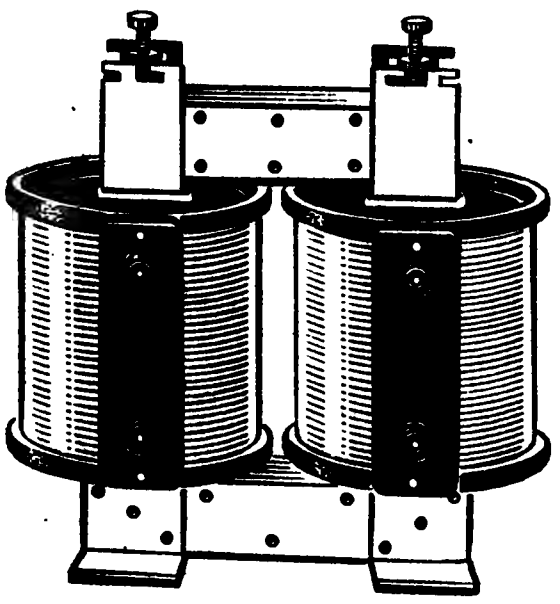


Рис. 58

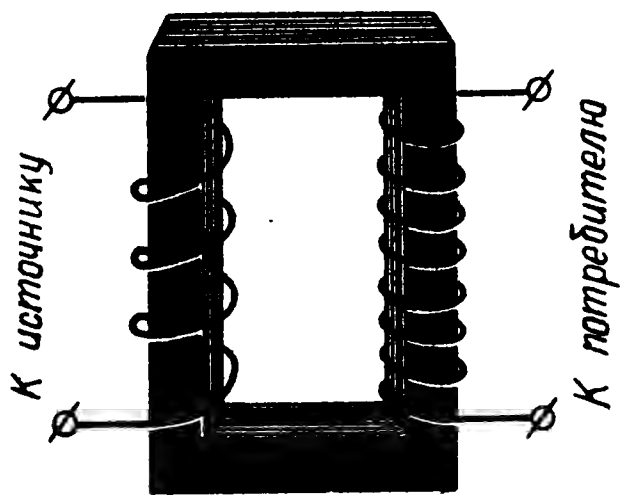


Рис. 59

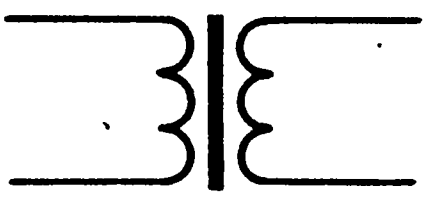


Рис. 60

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике появляется переменный магнитный поток, который возбуждает ЭДС индукции в каждой обмотке. Сердечник из трансформаторной стали концентрирует магнитное поле, так что магнитный поток существует практически только внутри сердечника и одинаков во всех его сечениях.

Мгновенное значение ЭДС индукции e в любом витке первичной или вторичной обмотки одинаково. Согласно закону Фарадея оно определяется формулой

$$e = -\Phi', \tag{3.1}$$

где Φ' — производная потока магнитной индукции по времени. Если $\Phi = \Phi_м \cos \omega t$, то

$$\Phi' = -\omega\Phi_м \sin \omega t. \tag{3.2}$$

Следовательно,

$$e = \omega\Phi_м \sin \omega t,$$

или

$$e = \mathcal{E}_м \sin \omega t, \tag{3.3}$$

где $\mathcal{E}_м = \omega\Phi_м$ — амплитуда ЭДС в одном витке.

В первичной обмотке, имеющей n_1 витков, полная ЭДС индукции e_1 равна $n_1 e$. Во вторичной обмотке полная ЭДС e_2 равна $n_2 e$ (где n_2 — число витков этой обмотки). Отсюда следует, что

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}. \tag{3.4}$$

Обычно активное сопротивление обмоток трансформатора мало, и им можно пренебречь. Поэтому, как уже было пояснено в § 25,

$$u_1 \approx -e_1. \tag{3.5}$$

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора ток в ней не течет и имеет место соотношение

$$u_2 = -e_2. \tag{3.6}$$

Так как мгновенные значения ЭДС e_1 и e_2 изменяются синфазно (одновременно достигают максимума и одновременно проходят через нуль), то их отношение в формуле (3.4) можно заменить отношением действующих значений $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ этих ЭДС или, учитывая равенства (3.5) и (3.6), отношением действующих значений напряжений U_1 и U_2:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \tag{3.7}$$

Величина K называется *коэффициентом трансформации*. При $K > 1$ трансформатор является понижающим, а при $K < 1$ — повышающим.

Если к концам вторичной обмотки присоединить цепь, потребляющую электроэнергию, или, как говорят, нагрузить трансформатор, то сила тока во вторичной обмотке уже не будет равна

нулю. Появившийся ток создает в сердечнике свой переменный магнитный поток, который по правилу Ленца должен уменьшить изменения магнитного потока в сердечнике.

Но уменьшение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока должно, в свою очередь, уменьшить ЭДС индукции в первичной обмотке. Однако это невозможно, так как согласно (3.5) $|u_1| = |e_1|$. Поэтому при замыкании цепи вторичной обмотки автоматически увеличивается сила тока в первичной обмотке. Его амплитуда возрастает таким образом, чтобы восстановить прежнее значение амплитуды колебаний результирующего магнитного потока. Увеличение силы тока в цепи первичной обмотки происходит в соответствии с законом сохранения энергии: отдача электроэнергии в цепь, присоединенную ко вторичной обмотке трансформатора, сопровождается потреблением от сети такой же энергии первичной обмоткой. Мощность в первичной цепи должна приблизительно равняться мощности во вторичной цепи:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \qquad (3.8)$$

где I_1 и I_2 — действующие значения силы тока в первичной и вторичной обмотках.

Отсюда следует, что

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \qquad (3.9)$$

Это означает, что, повышая с помощью трансформатора напряжение в несколько раз, мы во столько же раз уменьшаем силу тока (и наоборот).

Вследствие неизбежных потерь энергии на выделение тепла в обмотках и сердечнике уравнения (3.8) и (3.9) выполняются приближенно. Однако в современных мощных трансформаторах суммарные потери не превышают 2—3%.

§ 34. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Использование энергии. В наше время уровень потребления энергии [1] — один из важнейших показателей развития производительных сил общества. Ведущую роль при этом играет электроэнергия — самая универсальная и удобная для использования форма энергии. Если удвоение потребления энергии в мире происходит примерно за 25 лет, то удвоение потребления электроэнергии происходит в среднем за 10 лет. Это означает, что все большее и большее количество процессов, связанных с расходованием энергоресурсов, переводится на электроэнергию.

[1] Конечно, при этом сама энергия не исчезает. Задача энергетики состоит лишь в получении энергии в форме, наиболее удобной для потребления. В процессе «потребления» энергии она в конечном счете переходит главным образом во внутреннюю энергию (в теплоту).

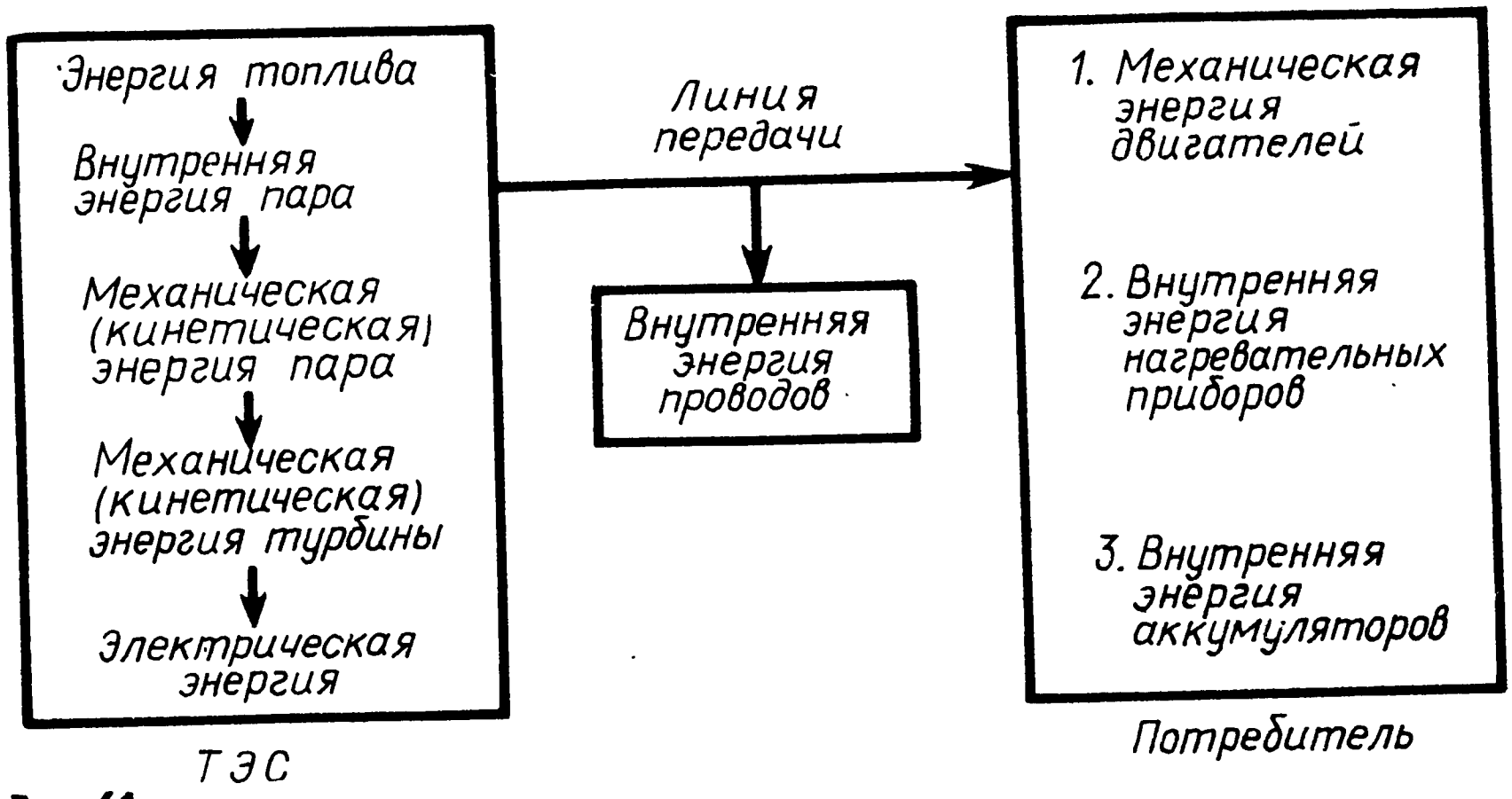


Рис. 61

Главным потребителем электроэнергии в нашей стране является промышленность, на долю которой приходится около 70% электроэнергии. Крупным потребителем является также транспорт, все большее количество железнодорожных линий переводится на электрическую тягу. Почти все колхозы и совхозы получают электроэнергию от государственных электростанций и пользуются ею для производственных и бытовых нужд. О применении электроэнергии для освещения жилищ и в бытовых электроприборах знает каждый.

Бóльшая часть используемой электроэнергии сейчас превращается в механическую энергию. Почти все механизмы в промышленности приводятся в движение электрическими двигателями. Они удобны, компактны, допускают возможность автоматизации производства.

Около трети электроэнергии, потребляемой промышленностью, используется для электросварки, электрического нагрева и плавления металлов, электролиза и т. п.

Производство электроэнергии. Производится электроэнергия на больших и малых электрических станциях в основном с помощью электромеханических индукционных генераторов. Существует два основных типа электростанций: *тепловые* и *гидроэлектрические*. Различаются эти электростанции характером двигателей, вращающих роторы генераторов.

На тепловых электростанциях источником энергии служит топливо: уголь, газ, нефть, мазут, горючие сланцы. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение паровыми и газовыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания. Наиболее экономичными являются крупные тепловые паротурбинные электростанции (сокращенно ТЭС). Большинство ТЭС нашей страны используют в качестве топлива угольную пыль. Для выработки 1 кВт · ч электроэнергии затрачивается несколько сот

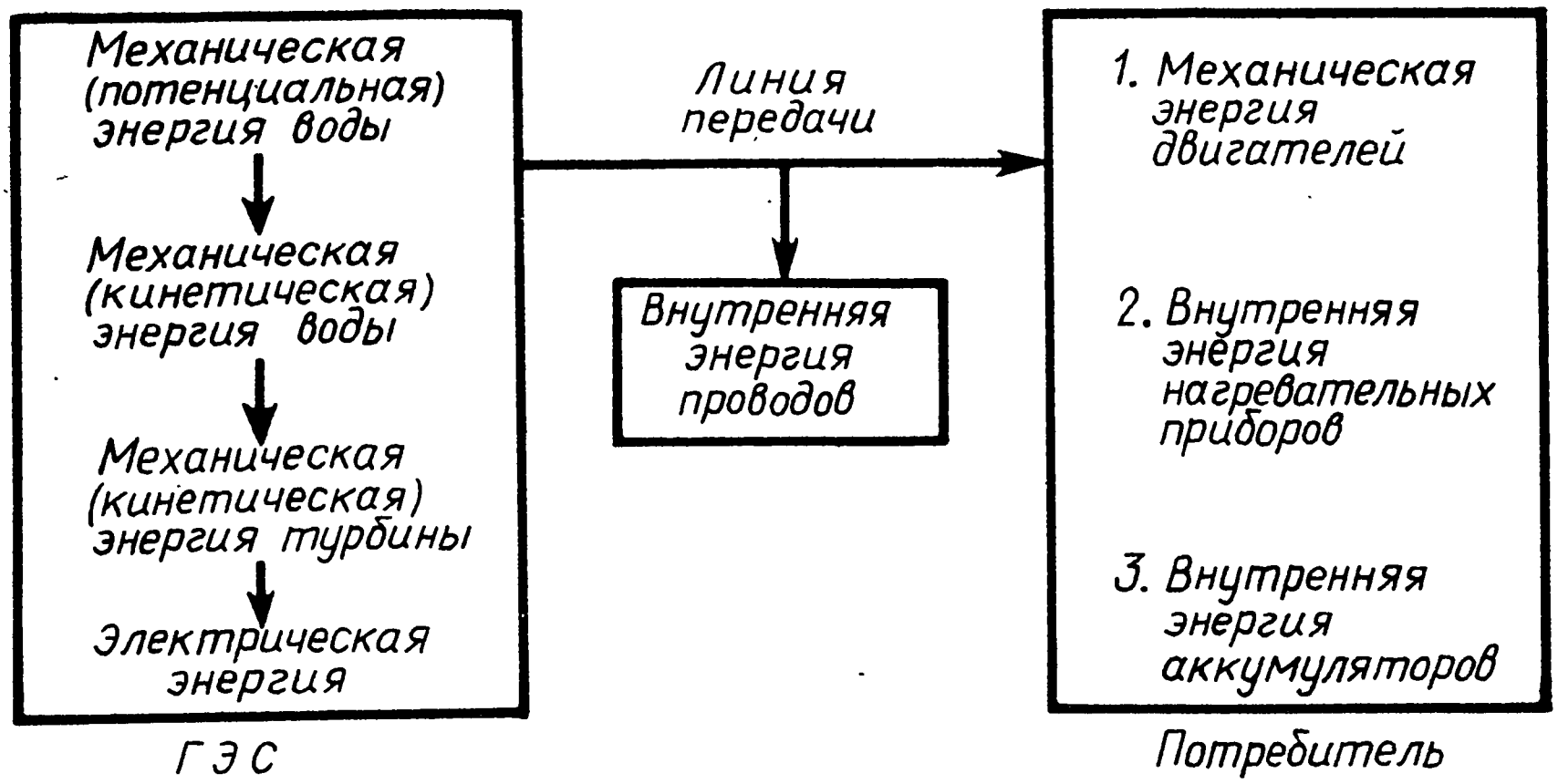


Рис. 62

граммов угля. В паровом котле свыше 90% выделяемой топливом энергии передается пару. В турбине кинетическая энергия струй пара передается ротору. Вал турбины жестко соединен с валом генератора. Паровые турбогенераторы весьма быстроходны: число оборотов составляет несколько тысяч в минуту.

Из курса физики IX класса известно, что КПД тепловых двигателей увеличивается с ростом начальной температуры рабочего тела. Поэтому поступающий в турбину пар доводят до высоких параметров: температуру — почти до 600° С и давление — до 300 ат. Коэффициент полезного действия ТЭС достигает 40%, причем бо́льшая часть энергии теряется вместе с горячим отработанным паром. Превращения энергии показаны на схеме, приведенной на рисунке 61.

Специальные тепловые электростанции, так называемые *теплоэлектроцентрали* (ТЭЦ), позволяют значительную часть энергии отработанного пара использовать на промышленных предприятиях и для бытовых нужд (нагревание воды для отопления и горячее водоснабжение). В результате КПД ТЭЦ достигает 60—70%. В настоящее время в нашей стране ТЭЦ дают около 40% всей электроэнергии и снабжают электроэнергией и теплом более 800 городов.

В области теплофикации Советский Союз занимает ведущее место в мировой энергетике.

На гидроэлектростанциях (ГЭС) используется для вращения роторов генераторов потенциальная энергия воды, поднятой плотиной. Роторы электрических генераторов приводятся во вращение гидравлическими турбинами. Мощность станции зависит от создаваемой плотиной разности уровней воды (напор) и от массы воды, проходящей через турбины в секунду (расход воды). Превращения энергии показаны на схеме, приведенной на рисунке 62.

Все большую роль в энергетике начинают играть *атомные электростанции* (АЭС). Первая в мире АЭС была сооружена в нашей стране в 1954 г.

Применение токов высокой частоты. Во многих случаях электрическую энергию удобно использовать в виде переменного тока, колебания которого происходят с частотой в десятки и сотни тысяч герц. Такие токи называют *токами высокой частоты.*

Быстропеременное магнитное поле, возникающее в катушке, по которой протекают токи высокой частоты, вызывает в проводниках, помещенных в катушку, переменную ЭДС индукции и, следовательно, вихревые индукционные токи. Эти токи нагревают проводник и могут его расплавить. Таким способом производят особо чистую плавку металлов в вакууме.

Чем выше частота, тем ближе к поверхности проводника сосредоточены вихревые токи. Пользуясь этим, можно очень быстро нагреть одну только внешнюю поверхность изделия, в то время как внутренние части останутся холодными. Быстро охладив затем изделие, получают деталь, у которой закален и, следовательно, приобрел высокую твердость лишь поверхностный слой. Внутренние же слои сохраняют при этом вязкость. Такие детали широко применяют в машиностроении.

В технике широко также используется высокочастотное электрическое поле конденсатора. Молекулы диэлектрика, помещенного в такое поле, приходят в колебательное движение, вследствие чего материал прогревается на всю глубину. Этот метод используется для сушки древесины, керамических изделий и т. п.

Токи высокой частоты применяют и в медицине. Помещая участки человеческого тела в высокочастотное поле, производят их поверхностный или глубинный прогрев.

§ 35. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Потребители электроэнергии имеются повсюду. Производится же она в сравнительно немногих местах, близких к источникам топливных и гидроресурсов. Электроэнергию не удается консервировать в больших масштабах. Она должна быть потреблена сразу после получения. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния. Такая передача связана с заметными потерями. Дело в том, что электрический ток нагревает провода линий электропередачи. В соответствии с законом Джоуля — Ленца энергия, расходуемая на нагрев проводов линии, определяется формулой

$$Q = I^2Rt,$$

где R — сопротивление линии. При очень большой длине линии передача энергии может стать экономически невыгодной. Значительно снизить сопротивление линии практически весьма трудно. Поэтому приходится уменьшать силу тока.

Так как мощность тока пропорциональна произведению силы тока на напряжение, то для сохранения передаваемой мощности нужно повысить напряжение в линии передачи. Причем, чем длиннее линия передачи, тем выгоднее использовать более высокое напряжение. Так, в высоковольтной линии передачи *Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС — Москва* используют напряжение в 500 кВ. Между тем генераторы переменного тока строят на напряжения, не превышающие 16—20 кВ, так как более высокое напряжение потребовало бы принятия сложных специальных мер для изоляции обмоток и других частей генераторов.

Поэтому на крупных электростанциях ставят повышающие трансформаторы. Трансформатор увеличивает напряжение в линии во столько же раз, во сколько уменьшает силу тока.

Для непосредственного использования электроэнергии в двигателях электропривода станков, в осветительной сети и для других целей напряжение на концах линии нужно понизить. Это достигается с помощью понижающих трансформаторов.

Обычно понижение напряжения и соответственно увеличение силы тока происходит в несколько этапов. На каждом этапе напряжение становится все меньше, а территория, охватываемая электрической сетью, все шире. Схема передачи и распределения электроэнергии приведена на рисунке 63.

При очень высоком напряжении между проводами начинается коронный разряд, приводящий к потерям энергии. Допустимая амплитуда переменного напряжения должна быть такой, чтобы при заданной толщине провода потери энергии вследствие коронного разряда были незначительными.

Наиболее перспективным способом передачи электроэнергии на дальние расстояния является использование постоянного тока, Линии электропередачи постоянного тока позволяют передавать по тем же проводам бóльшую энергию, так как постоянное напряжение между проводами можно сделать равным допустимому амплитудному напряжению линии переменного тока. Кроме того, при передаче электроэнергии постоянным током исчезают затруднения, связанные с индуктивным сопротивлением и емкостью

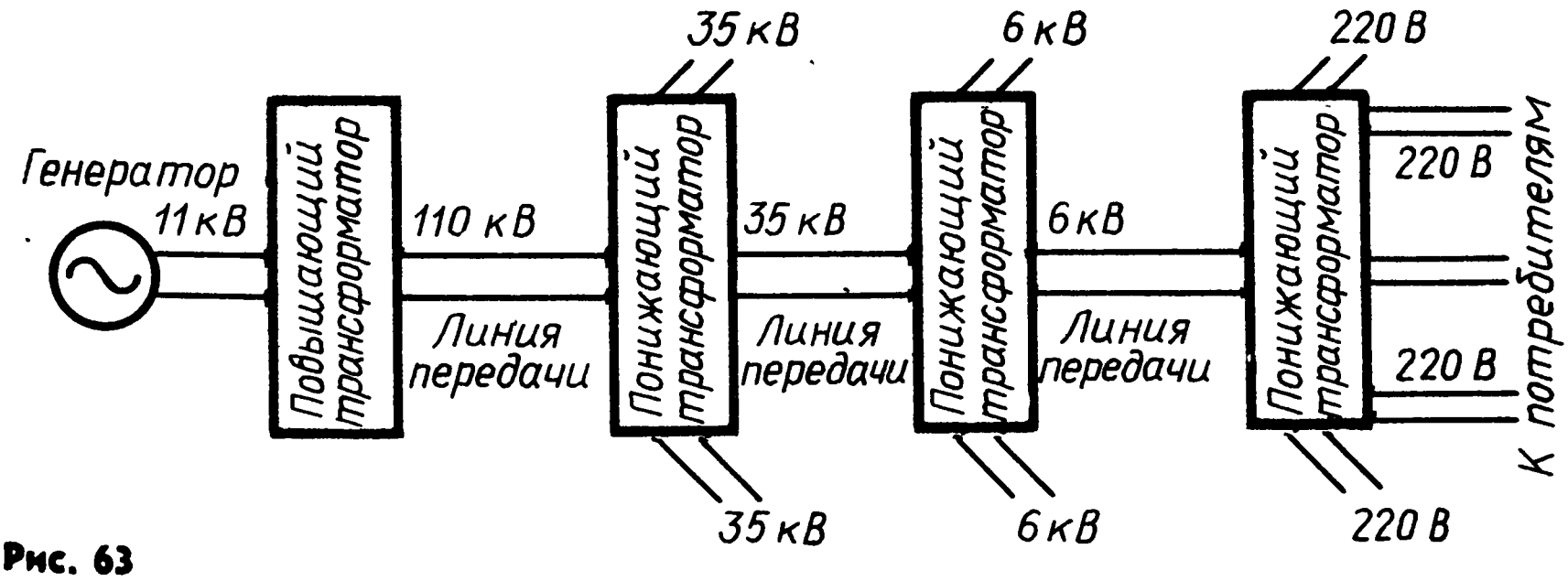


Рис. 63

линии. Это особенно существенно при передаче электроэнергии на большие расстояния.

При передаче электроэнергии постоянным током вырабатываемое генераторами электростанции переменное напряжение предварительно повышают с помощью трансформаторов, а затем с помощью специальных устройств (инверторов) преобразуют в постоянное напряжение. В конце линии электропередачи постоянное напряжение снова преобразуют в переменное, после чего с помощью трансформаторов его понижают до нужной величины. Трудности, связанные с преобразованием постоянного тока в переменный и обратно, успешно преодолеваются.

Электрические станции ряда районов страны объединены высоковольтными линиями передач, образуя общую электрическую сеть, к которой присоединены потребители. Такое объединение, называемое *энергосистемой,* дает возможность сгладить «пиковые» нагрузки потребления энергии в утренние и вечерние часы. Энергосистема обеспечивает бесперебойность подачи энергии потребителям вне зависимости от места их расположения. Сейчас почти вся территория Советского Союза обеспечивается электроэнергией объединенными энергетическими системами. Уже действует Единая энергетическая система европейской части СССР.

§ 36. УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР

В 1920 г. был принят первый в истории человечества перспективный план развития народного хозяйства страны на основе электрификации—план ГОЭЛРО (Государственный план электрификации России). Инициатором и вдохновителем разработки плана был В. И. Ленин, придававший электрификации решающее значение в переустройстве экономики страны.

В. И. Ленин говорил: «Только тогда, когда страна будет электрифицирована, когда под промышленность, сельское хозяйство и транспорт будет подведена техническая база современной крупной промышленности, только тогда мы победим окончательно».

Минувшие полвека — убедительное свидетельство великой силы ленинских идей. План ГОЭЛРО, предусматривавший удвоение промышленного производства и увеличение в 4 раза выработки электроэнергии по сравнению с 1913 г., был к намеченному сроку (через 10 лет) перевыполнен по всем показателям. Наращивая темпы электрификации из года в год, Советский Союз к 1947 г. вышел по производству электроэнергии на первое место в Европе и на второе место в мире.

Сейчас за один день в нашей стране производится электроэнергии приблизительно в 5 раз больше, чем за весь 1921 г.—первый год выполнения плана ГОЭЛРО.

Гидроэлектростанции дают около 20% всей электрической энергии нашей страны. Крупнейшей в мире ГЭС ныне является

Красноярская ГЭС им. 50-летия СССР. На ней установлены самые мощные в мире гидроагрегаты по 500 тыс. кВт; общая мощность этой станции достигает 6 млн. кВт.

Что касается тепловых электростанций, то их развитие тоже идет в сторону увеличения мощности. Сейчас в Советском Союзе эксплуатируется большое число тепловых электростанций мощностью свыше 1 млн. кВт каждая. Многие из них имеют мощность свыше 2 млн. кВт, а Криворожская ГРЭС достигла мощности 3 млн. кВт и в настоящее время стала самой крупной тепловой электростанцией в мире.

Все большую роль в электроэнергетике начинают играть атомные электростанции большой мощности. Решениями XXV съезда КПСС предусмотрено опережающее развитие атомной энергетики в европейской части СССР.

• Путем объединения энергосистем Сибири и Средней Азии с энергетической системой европейской части страны формируется Единая энергетическая система Советского Союза. Это повысит надежность и маневренность электроснабжения громадной территории страны. Решение этой задачи потребует сооружения магистральных линий электропередачи на 500 000, 750 000 и 1 150 000 В.

? **1. Какими преимуществами обладает переменный ток перед постоянным?**
2. На каком принципе основана работа генераторов переменного тока?
3. Что называют коэффициентом трансформации?
4. Как осуществляется передача электроэнергии на большие расстояния?

УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Как должны быть расположены изолированные друг от друга стальные пластины сердечника ротора индукционного генератора для уменьшения вихревых токов?
2. Проволочная прямоугольная рамка вращается в однородном магнитном поле. В каком случае наводимая в рамке ЭДС максимальна: когда плоскость рамки перпендикулярна линиям магнитной индукции или когда она параллельна им?
3. Обмотки трансформатора сделаны из провода разной толщины. Какая из обмоток содержит большее число витков?
4. Придумайте способ определения числа витков обмотки трансформатора, не разматывая катушки.
5. Что может произойти, если случайно подключить трансформатор к источнику постоянного тока?
6. Если в обмотке трансформатора замкнется один виток, трансформатор выходит из строя. Почему?
7. Определить число пар полюсов ротора генератора Братской ГЭС, если частота вращения ротора 125 об/мин.
8. Найти коэффициент трансформации всех трансформаторов, изображенных на рисунке 63 (потерями энергии пренебречь).
9. Сила тока в первичной обмотке трансформатора $I_1 = 15\,000$ А и напряжение на ее концах $U_1 = 11\,000$ В. Сила тока во вторичной обмотке $I_2 = 1440$ А и напряжение на ее концах $U_2 = 110$ кВ. Определить коэффициент полезного действия трансформатора.

Глава IV

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК

§ 37. ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Каждый из вас наблюдал, как от камня, брошенного на спокойную поверхность пруда или озера, кольцами разбегаются волны (рис. 64). Многие следили за морскими волнами, набегающими на берег. Все читали рассказы о морских путешествиях, о чудовищной силе морских волн, легко раскачивающих большие корабли. Однако при наблюдении этих явлений не всем приходит в голову, что звук всплеска воды доносится до нашего уха волнами в том воздухе, которым мы дышим, что свет, благодаря которому мы видим, тоже представляет собой волновое движение. Волновые процессы чрезвычайно широко распространены в природе. Различны физические причины, вызывающие волновые движения. Но, подобно колебаниям, все виды волн описываются количественно, одинаковыми или почти одинаковыми законами. Многие трудные для понимания вопросы становятся более ясными, если сравнивать различные волновые явления друг с другом.

Что же называют волной? Почему возникают волны?

Отдельные частицы любого тела — твердого, жидкого или газообразного — взаимодействуют друг с другом. Поэтому если какая-либо частица тела начинает совершать колебательное движение, то благодаря взаимодействию между частицами это движение начинает с некоторой скоростью распространяться во все стороны.

Волной называют колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.

В воздухе, в твердых телах и внутри жидкостей механические волны возникают благодаря силам упругости. Эти силы осуществляют связь между отдельными частями тела. В образовании волн на поверхности воды играют роль сила тяжести и сила поверхностного натяжения.

Рис. 64

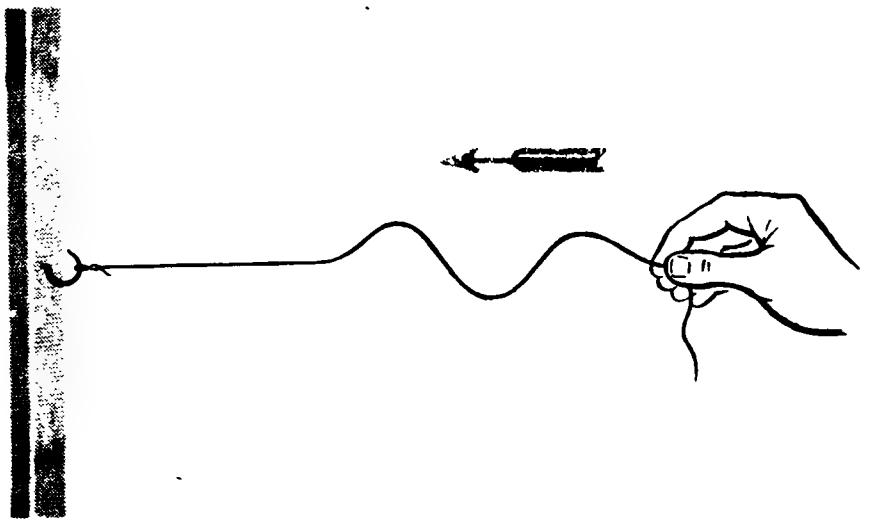


Рис. 65

Наиболее наглядно главные особенности волнового движения можно видеть на примере волн на поверхности воды. Волны представляются бегущими вперед округлыми валами, причем расстояния между валами, или гребнями, примерно одинаковы. Однако если бросить в воду легкий предмет, например спичечную коробку, то он не будет увлекаться вперед волной, а начнет совершать колебания вверх и вниз, оставаясь почти точно на одном месте.

При распространении волны происходит перемещение определенного состояния колеблющейся среды, но не перенос вещества. Возникшие в одном месте возмущения воды, например от брошенного камня, передаются соседним участкам и постепенно распространяются во все стороны. Течение же воды не возникает: перемещается лишь форма ее поверхности.

Скорость волны. Важнейшей характеристикой волны является ее скорость. Волны любой природы не распространяются в пространстве мгновенно. Их скорость к о н е ч н а. Можно себе, например, представить, что над морем летит чайка так, что все время находится над одним и тем же гребнем волны. Скорость волны в этом случае будет равна скорости чайки. Волны на поверхности воды удобны для наблюдения по той причине, что скорость их распространения невелика.

Поперечные и продольные волны. Нетрудно также наблюдать волны, распространяющиеся вдоль резинового шнура. Если один конец шнура закрепить и, слегка натянув шнур рукой, привести другой его конец в колебательное движение, то по шнуру побежит волна (рис. 65). Скорость волны будет тем больше, чем сильнее натянут шнур. Волна добежит до точки закрепления шнура, отразится и побежит назад. Здесь при распространении волны происходят изменения формы шнура. Каждый же участок шнура колеблется относительно своего неизменного положения равновесия. Обратите внимание на то, что при распространении волны вдоль шнура отдельные участки шнура совершают колебания в направлении, п е р п е н д и к у л я р н о м направлению распространения волны (рис. 66). Такие волны называются *поперечными.*

Но не любая волна является поперечной. Колебания могут происходить и в д о л ь направления распространения волны (рис. 67). Тогда волна называется *продольной.* Продольную волну удобно наблюдать с помощью длинной мягкой пружины большого диаметра. Ударив ладонью по одному из концов пружины (рис. 68, *а*), можно заметить, как сжатие (упругий импульс) бе-

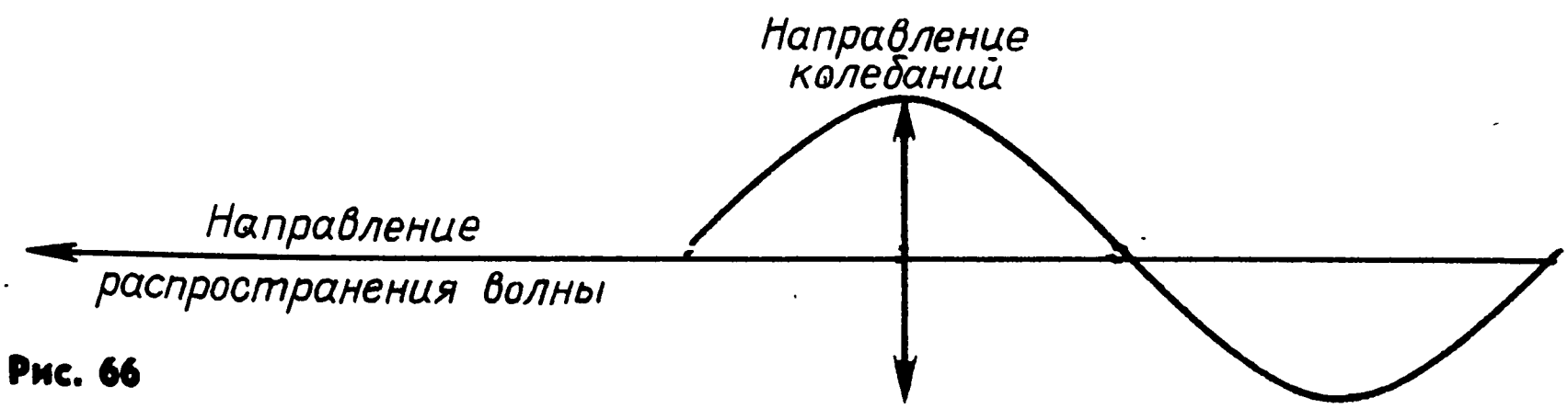


Рис. 66

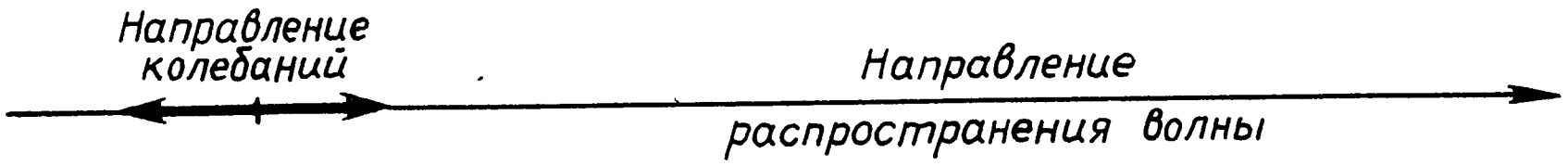


Рис. 67

жит по пружине. С помощью серии последовательных ударов можно возбудить в пружине волну, представляющую собой последовательные сжатия и растяжения пружины, бегущие друг за другом (рис. 68, *б*). Колебания любого витка пружины происходят вдоль направления распространения волны. Из механических волн наибольшее значение имеют звуковые волны. Однако исследовать звуковые волны труднее, чем волны вдоль шнура или пружины.

Энергия волны. При распространении волны происходит передача движения от одного участка тела к другому. С передачей движения связана передача энергии [1]. Основное свойство всех волн, независимо от их природы, состоит в переносе ими энергии без переноса вещества. Энергия поступает от источника, возбуждающего колебания начала шнура, струны и т. д., и распространяется вместе с волной. Эта энергия, например, в шнуре слагается из кинетической энергии движения участков шнура и потенциальной энергии его упругой деформации. Постепенное уменьшение амплитуды колебаний при распространении волны вдоль шнура связано с превращением части механической энергии во внутреннюю.

Электромагнитные волны. Механические волны распространяются в веществе: газе, жидкости или твердом теле. Существует, однако, еще один вид волн, которые не нуждаются в каком-либо веществе для своего распространения. Это электромагнитные волны, к которым, в частности, относятся радиоволны и свет. Электромагнитное поле может существовать в вакууме (в пустоте), т. е. в пространстве, не содержащем атомов. Несмотря на существенное отличие электромагнитных волн от механических волн, электромагнитные волны при своем распространении ведут себя подобно механическим. В частности, и электромагнитные волны имеют конечную скорость и переносят с собой энергию. Это важнейшие свойства всех видов волн.

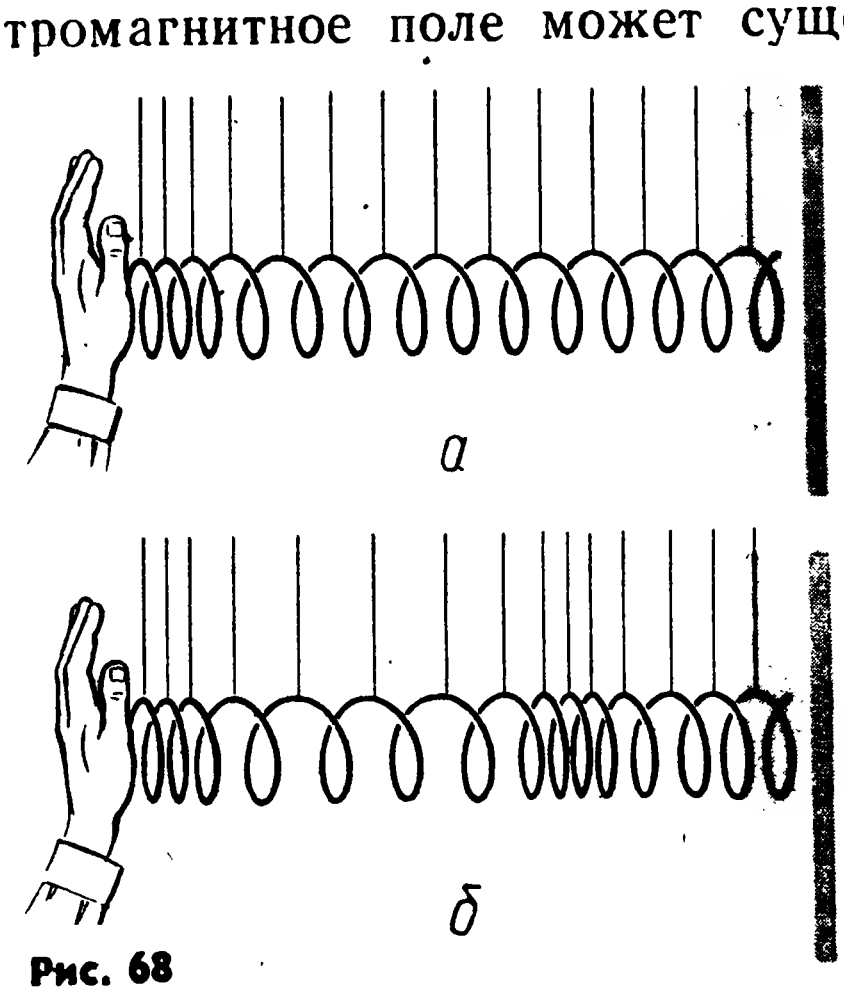


Рис. 68

[1] Представление о распространении энергии было впервые введено в физику русским ученым Н. А. Умовым (1846—1915).

§ 38. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН

Теперь рассмотрим процесс распространения волн более детально. Проследим за движением отдельных частиц вещества при волновом движении. Сначала рассмотрим **поперечную волну,** которая распространяется, например, вдоль резинового шнура.

Каждый участок шнура обладает массой и упругостью. При деформации шнура в любом его сечении появляются силы упругости. Эти силы стремятся возвратить шнур в исходное положение. Благодаря инертности участок колеблющегося шнура не останавливается в положении равновесия, а проходит его, продолжая двигаться до тех пор, пока силы упругости не остановят этот участок в момент максимального отклонения от положения равновесия.

Вместо реального шнура возьмем цепочку одинаковых металлических шаров, подвешенных на нитях. Шары связаны между собой пружинками (рис. 69). Масса пружинок много меньше массы шаров. В этой модели инертные (масса) и упругие свойства разделены: масса сосредоточена в основном в шарах, а упругость — в пружинках. Это различие несущественно при исследовании волнового движения.

Если отклонить левый крайний шар в горизонтальной плоскости, то пружина деформируется и на 2-й шар начнет действовать сила, заставляя его отклоняться в ту же сторону, в которую был отклонен 1-й шар. Вследствие инертности движение 2-го шара не будет происходить согласованно с первым. Его движение, повторяющее движение 1-го шара, будет запаздывать по времени.

Если 1-й шар заставить колебаться с периодом T (просто рукой или с помощью какого-либо механизма), то 2-й шар тоже придет в колебательное движение вслед за первым, но с некоторым отставанием по фазе. Третий шар под влиянием силы упругости, вызванной движением 2-го шара, тоже начнет колебаться, еще более отставая по фазе, и т. д. Наконец, все шары будут совершать вынужденные колебания с одной и той же частотой, но с различными фазами. При этом вдоль цепочки шаров побежит поперечная волна.

На рисунке 70, *а, б, в, г, д, е* изображен процесс распространения волны. Показаны положения шаров в последовательные моменты времени, отстоящие друг от друга на четверть периода колебаний (вид сверху). Стрелки у шаров — это векторы скорости их движения в соответствующие моменты времени.

На модели упругого тела, состоящей из массивных шаров, связанных пружинками (рис. 71, *а*), можно наблюдать процесс распространения **продольных волн.** Шары подвешены так, чтобы они могли колебаться только вдоль цепочки. Если первый шар привести в колебательное движение с периодом T, то вдоль цепочки побежит продольная волна, состоящая из чередующихся уплотнений и разрежений шаров (рис. 71, *б*).

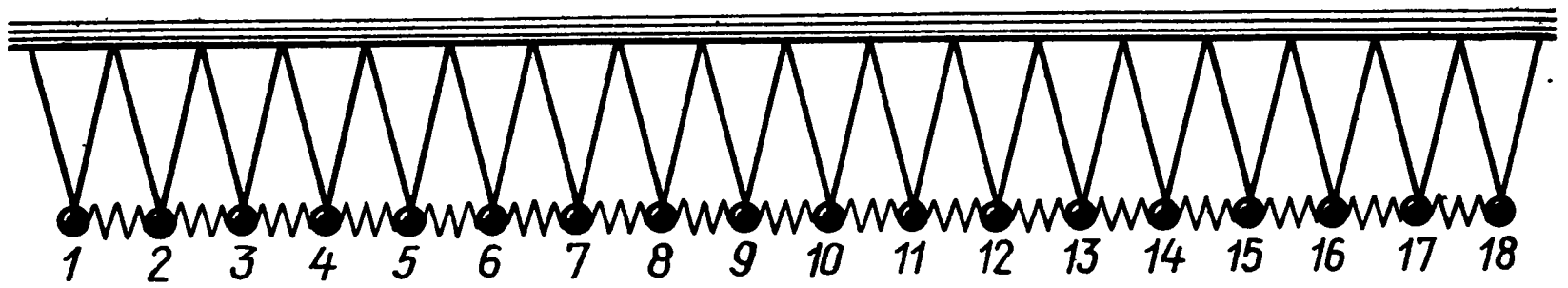

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Рис. 69

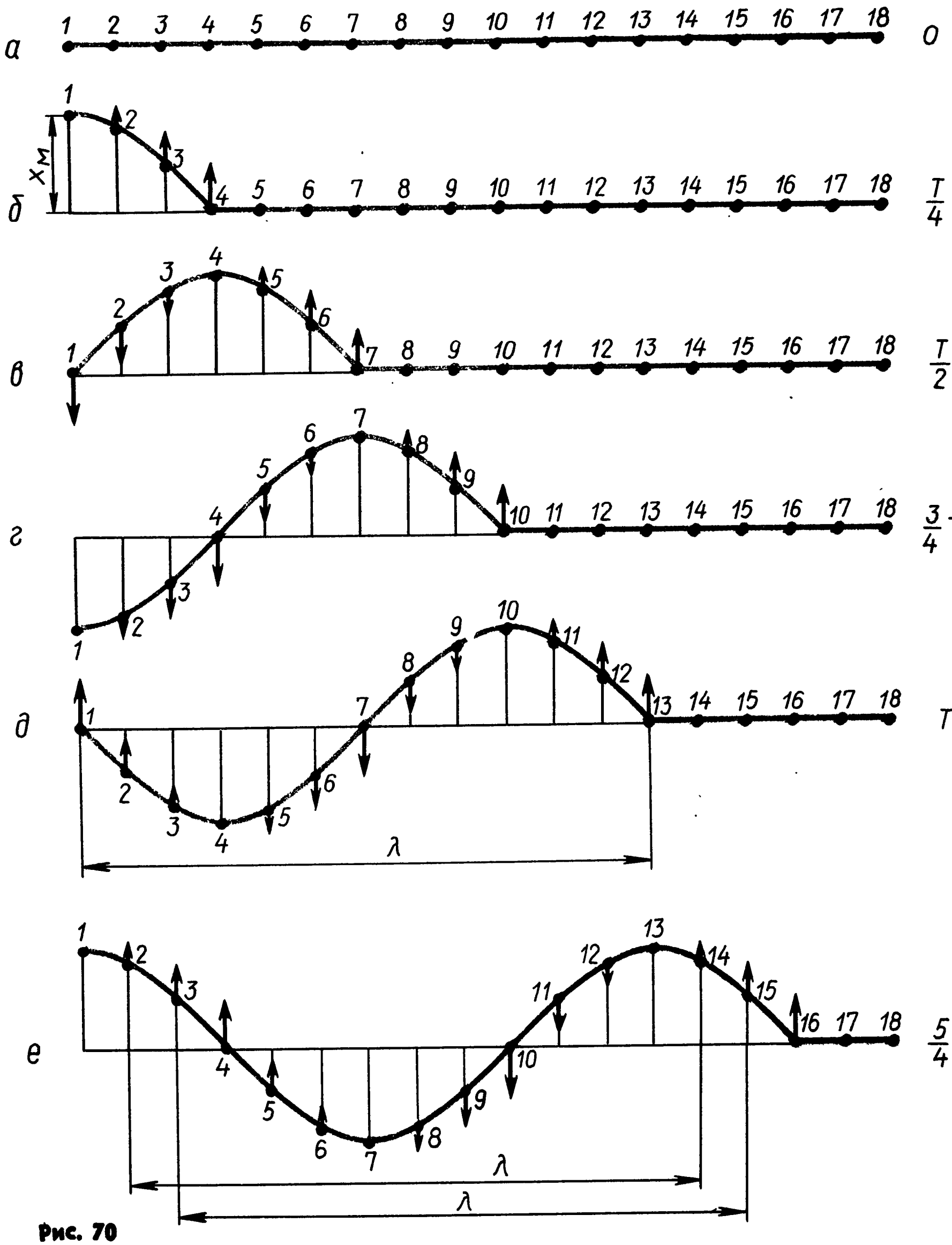

а
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
0
б
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
$x_м$
$\frac{T}{4}$
в
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
$\frac{T}{2}$
г
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
$\frac{3}{4}T$
д
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
λ
T
е
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
λ
λ
$\frac{5}{4}T$

Рис. 70

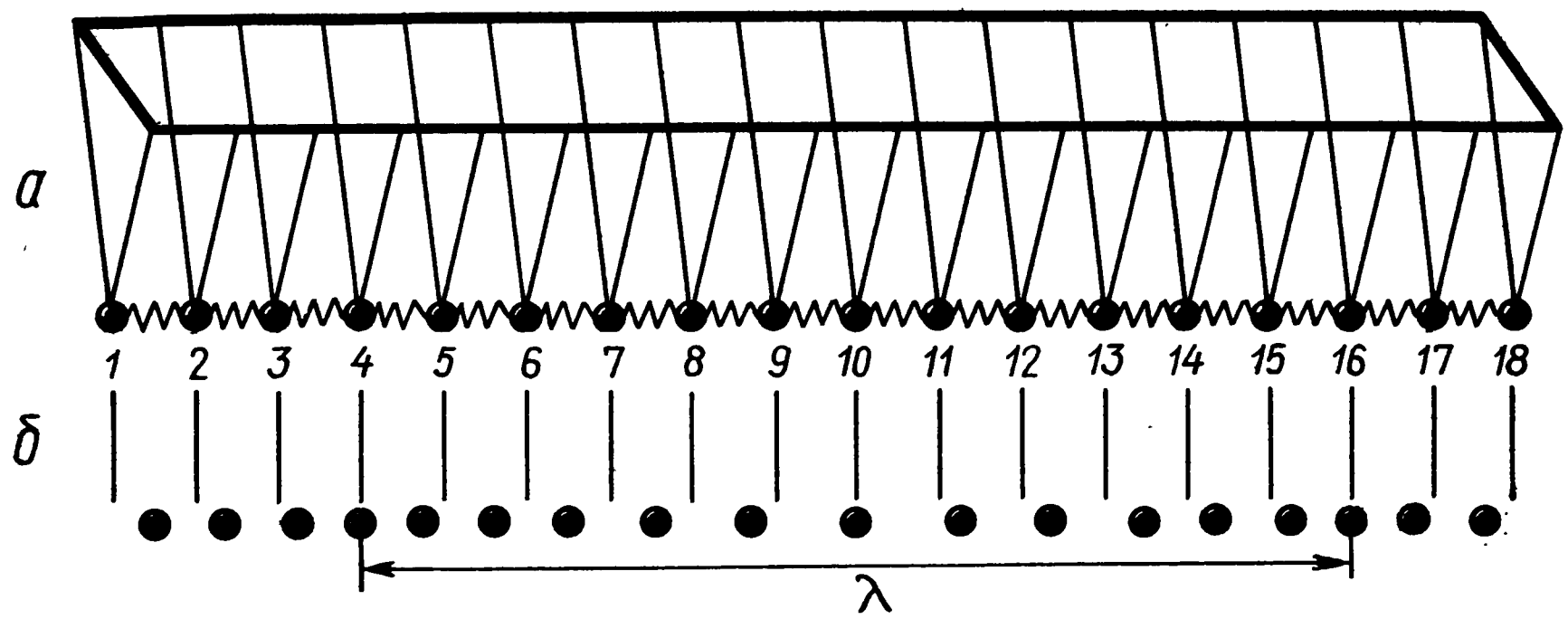


Рис. 71

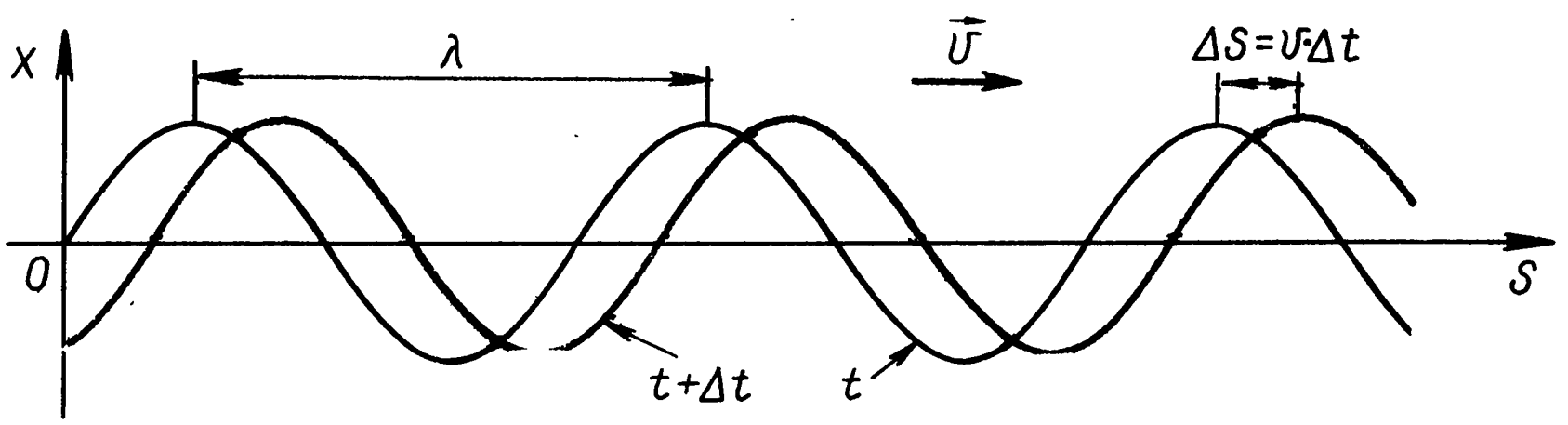


Рис. 72

§ 39. ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ ВОЛНЫ

После того как колебания при распространении поперечной волны достигнут 13-го шара, 1-й и 13-й шары будут колебаться совершенно одинаково. Когда 1-й шар находится в положении равновесия и движется влево (см. рис. 70, *д*), то и 13-й шар находится в положении равновесия и тоже движется влево. Спустя еще четверть периода 1-й шар оказывается максимально отклоненным влево и в таком же положении находится 13-й шар (см. рис. 70, *е*). Колебания этих шаров происходят в одинаковых фазах. **Расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах, называется длиной волны.** Следовательно, расстояния между 1-м и 13-м, между 2-м и 14-м, между 3-м и 15-м шарами равны длине волны (см. рис. 70, *д, е*).

Длина продольной волны согласно рисунку 71, *б* равна расстоянию между 2-м и 14-м шарами или между 4-м и 16-м шарами. Длина волны обозначается греческой буквой λ (лямбда).

При распространении волны разные точки тела (шары в рассматриваемой модели) колеблются с различными фазами, если только расстояние между ними не равно $n\lambda$ (где n—целое число).

Шары 1-й и 7-й (см. рис. 70), находящиеся на расстоянии $\lambda/2$, колеблются в противоположных фазах: когда 1-й шар движется влево, 7-й смещается вправо, и наоборот.

За один период волна распространяется на расстояние λ (см. рис. 70, *д*). Поэтому ее скорость определяется формулой

$$v = \frac{\lambda}{T}. \qquad (4.1)$$

Так как период T и частота ν связаны соотношением

$$T = \frac{1}{\nu},$$

то

$$v = \lambda\nu. \qquad (4.2)$$

Скорость волны равна произведению длины волны на частоту колебаний.

При распространении волны в шнуре мы имеем дело с периодичностью двоякого рода.

Во-первых, каждая частица шнура совершает периодические колебания во времени. В случае гармонических колебаний (эти колебания происходят по синусоидальному или косинусоидальному закону) частота и амплитуда колебаний одинаковы во всех точках. Колебания отличаются только фазами.

Во-вторых, в данный момент времени форма волны повторяется в пространстве через отрезки шнура длиной λ. На рисунке 72 показан профиль волны в определенный момент времени (черная линия). С течением времени вся эта картина перемещается со скоростью v слева направо.

Спустя промежуток времени

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v}$$

волна будет иметь вид, изображенный на том же рисунке синей линией.

Для продольной волны также справедлива формула (4.2), связывающая скорость распространения волны, длину волны и частоту колебаний.

?

1. Что называют волной?
2. В чем состоит различие между поперечными и продольными волнами? Приведите примеры поперечных и продольных волн.
3. Каковы основные особенности волнового движения?
4. Что называют длиной волны?
5. Как связана скорость волны с длиной волны?
6. Определите по рисунку 70, какова разность фаз колебаний двух соседних шаров.

§ 40. ВОЛНЫ В СРЕДЕ

В резиновом шнуре, струне или стержне волны могут бежать только по одному направлению — вдоль них.

Если же газ, жидкость или твердое тело сплошь заполняют некоторую область пространства (сплошная среда), то возникшие в одном месте колебания распространяются по всем направлениям. При этом общая картина распространения волн остается прежней.

Но имеются и специфические особенности.

Волна при своем распространении от какого-либо источника в сплошной среде постепенно захватывает все большие и большие области пространства. Это хорошо видно на рисунке 64, на котором изображены круговые волны на поверхности воды от брошенного камня. Энергия, которую несут с собой волны от источника, с течением времени распределяется во все большей и большей области пространства. Поэтому энергия, переносимая через единицу поверхности за одну секунду, уменьшается по мере удаления от источника. Следовательно, уменьшается и амплитуда колебаний по мере удаления от источника. Ведь энергия колеблющегося тела пропорциональна квадрату амплитуды (см. § 11). Это справедливо для колебаний не только груза на пружине или маятника, но и любой частицы среды.

Таким образом, амплитуда волны в среде по мере ее удаления от источника обязательно уменьшается, даже если механическая энергия не превращается во внутреннюю за счет действия в среде сил трения.

Исключение составляет так называемая *плоская волна.* Такую волну можно получить, если поместить в упругую среду большую пластину и заставить ее колебаться в направлении нормали. Все точки среды, примыкающие к пластине, будут совершать колебания с одинаковыми амплитудами и в одной и той же фазе. Эти колебания будут распространяться в виде волн в направлении нормали к пластине, причем все частицы среды, лежащие в плоскости, параллельной пластине, будут колебаться в одной фазе. **Поверхности равной фазы называют волновыми поверхностями.** В случае плоской волны волновые поверхности представляют собой плоскости (рис. 73). Реальная волна может считаться плоской лишь приблизительно (на краях волновые поверхности искривляются).

Линия, нормальная к волновой поверхности, называется лучом. Под направлением распространения волн понимают направление лучей. Лучи для плоских волн являются параллельными прямыми. Вдоль лучей происходит перенос энергии.

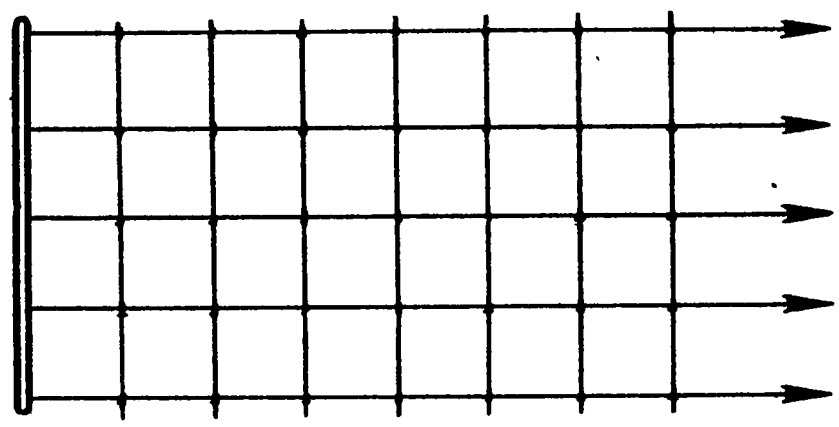


Рис. 73

При распространении плоской волны размеры волновых поверхностей по мере удаления от пластины не меняются (или почти не меняются). Поэтому энергия волны не рассеивается в пространстве, и амплитуда колебаний уменьшается только за счет действия сил трения.

На поверхности воды легко получить л и н е й н ы е в о л н ы, которые дают наглядное представление о плоских волнах в пространстве. Для этого нужно стержень, слегка касающийся поверхности воды, заставить колебаться в направлении, перпендикулярном к поверхности воды. Все частицы воды, находящиеся на прямой, параллельной стержню, будут колебаться в одной фазе (рис. 74).

Другой пример волны в сплошной среде — это *сферическая,* или *шаровая, волна.* Она возникает, если поместить в среду пульсирующую сферу (рис. 75). В этом случае волновые поверхности являются сферами. Лучи направлены вдоль продолжений радиусов пульсирующей сферы.

Амплитуда колебаний частиц в случае сферической волны обязательно убывает по мере удаления от источника. Энергия, излучаемая источником, в этом случае равномерно распределяется по поверхности сферы, радиус которой непрерывно увеличивается по мере распространения волны.

Как вы знаете, волны могут быть поперечными и продольными. В поперечной волне смещения отдельных участков среды происходят в направлении, перпендикулярном распространению волны. При этом возникает упругая деформация, называемая деформацией сдвига. Отдельные слои вещества сдвигаются друг относительно друга. Объем тела не изменяется. При деформации сдвига в твердом теле возникают силы упругости, стремящиеся вернуть тело в исходное состояние. Именно эти силы и вызывают колебания частиц среды.

Сдвиг слоев друг относительно друга в газах и жидкостях не приводит к появлению сил упругости. Поэтому в газах и жидкостях не могут существовать поперечные волны. Поперечные волны возникают только в твердых телах [1]

---

[1] Поперечные волны возникают и на поверхности жидкости, но не внутри ее.

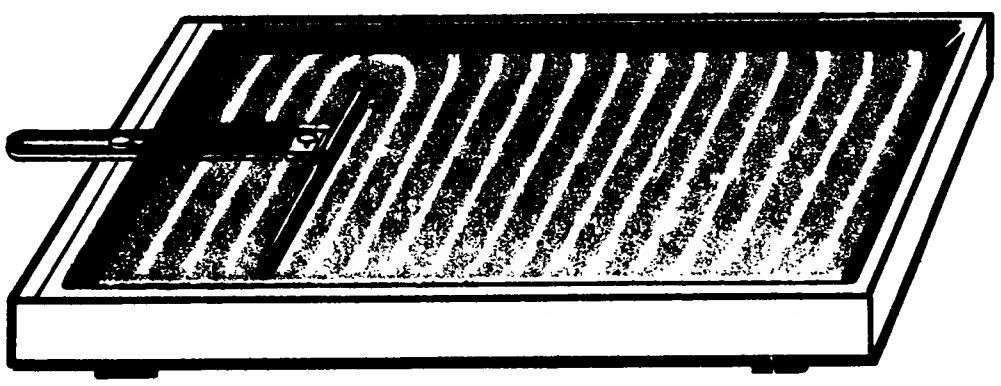


Рис. 74

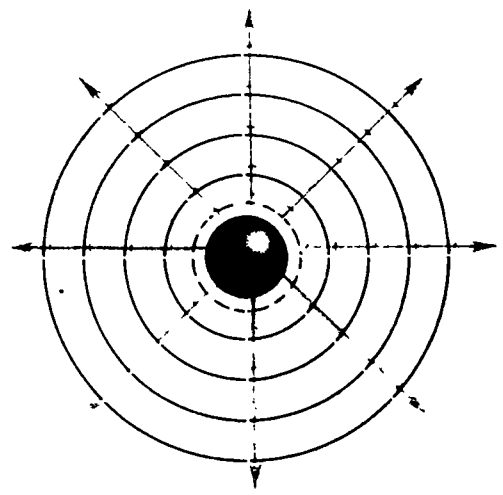


Рис. 75

В продольной волне происходит деформация сжатия и растяжения (см. § 37). Силы упругости, связанные с этой деформацией, возникают как в твердых телах, так и в жидкостях и газах. Эти силы вызывают колебания отдельных участков среды. Поэтому продольные волны могут распространяться во всех средах.

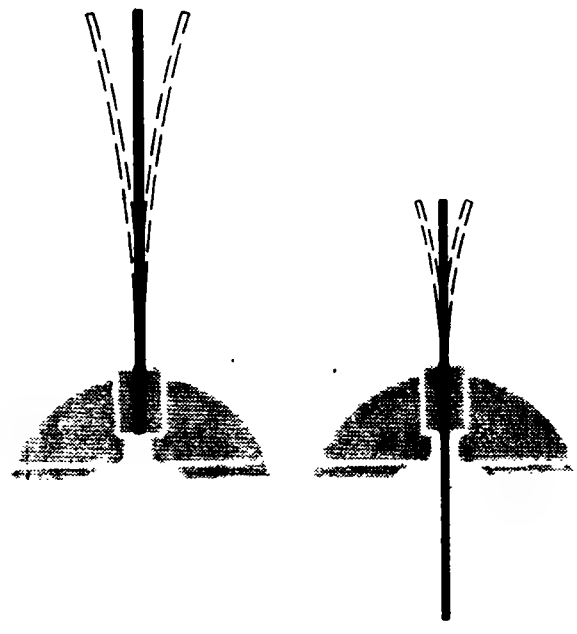


Рис. 76

В твердых телах скорость продольных волн больше скорости поперечных волн. Это обстоятельство используется для определения расстояния от очага землетрясения до сейсмической станции. Вначале на станции регистрируется продольная волна, так как ее скорость в земной коре больше. чем у поперечной. Спустя некоторое время регистрируется поперечная волна, возбуждаемая при землетрясении одновременно с продольной. Зная скорости продольных и поперечных волн в земной коре и время запаздывания поперечной волны, можно определить расстояние до очага землетрясения.

§ 41. ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Возбуждение звуковых волн. Волны на поверхности воды или волны вдоль резинового шнура можно непосредственно видеть. В прозрачной среде — воздухе или жидкости — волны невидимы. Но при определенных условиях их можно слышать. Если длинную железную линейку зажать в тисках или плотно прижать к краю стола, то, отклонив конец линейки от положения равновесия, мы возбудим ее колебания (рис. 76, *а*). Но эти колебания не будут восприниматься нашим ухом. Если, однако, укоротить выступающий конец линейки (рис. 76, *б*), то мы обнаружим, что линейка начнет звучать.

Пластина сжимает прилегающий к одной из ее сторон слой воздуха и одновременно создает разрежение с другой стороны. Эти сжатия и разрежения чередуются во времени и распространяются в обе стороны в виде упругой продольной волны. Последняя достигает нашего уха и вызывает вблизи него периодические колебания давления, которые воздействуют на слуховой аппарат.

Наше ухо воспринимает в виде звука колебания, частота которых лежит в пределах от 17—20 до 20 000 Гц. Такие колебания называются *акустическими.* **Акустика — это учение о звуке.** Чем короче выступающий конец линейки, тем больше частота его колебаний. Поэтому мы начинаем слышать звук, когда конец линейки становится достаточно коротким.

Любое тело (твердое, жидкое или газообразное), колеблющееся со звуковой частотой, создает в окружающей среде звуковую волну.

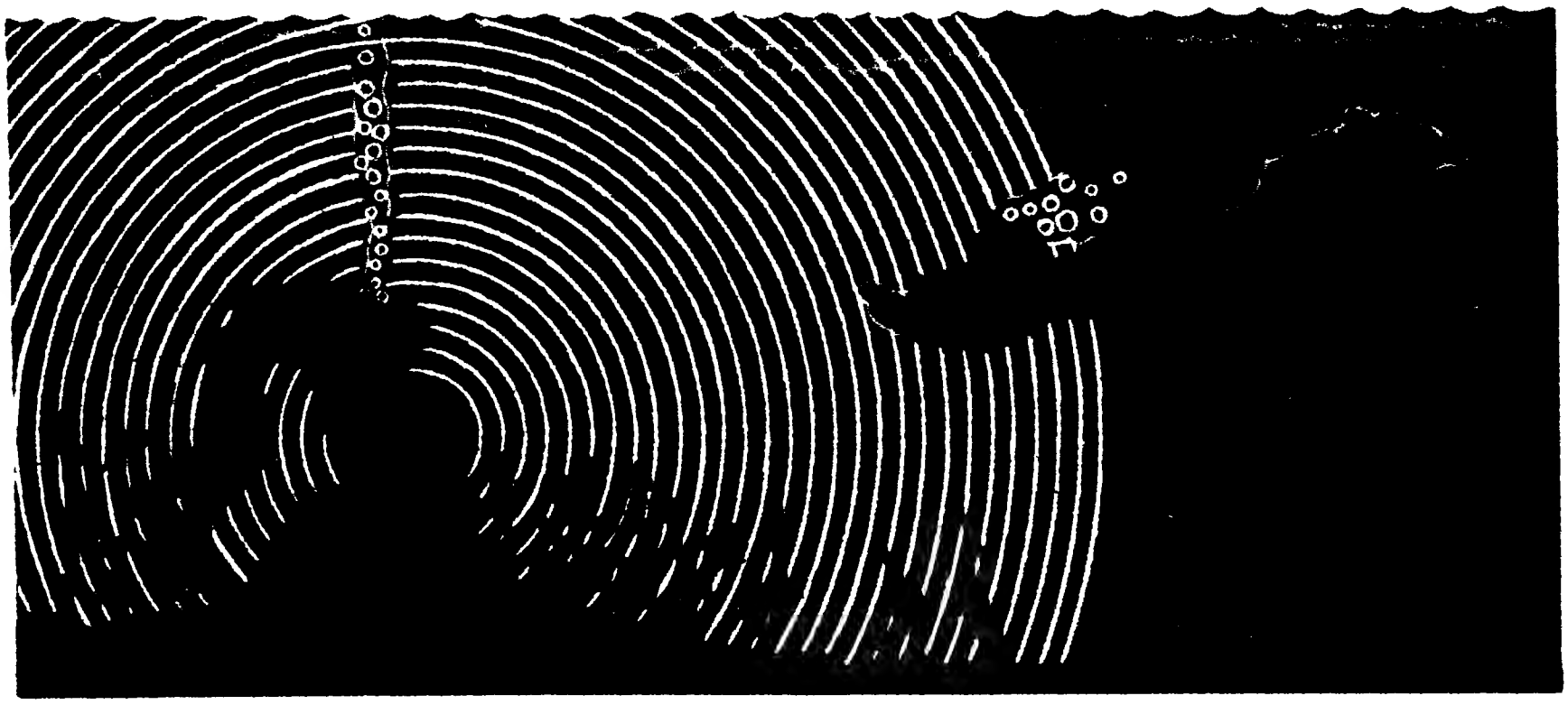


Рис. 77

Звуковые волны в различных средах. Чаще всего звуковые волны достигают наших ушей по воздуху. Довольно редко мы оказываемся погруженными целиком в воду. Но, конечно, воздух не имеет каких-либо особых преимуществ по сравнению с другими средами в смысле возможности распространения в нем звуковых волн. Звук распространяется в воде и в твердых телах. Нырнув с головой во время купания, вы можете услышать звук от удара двух камней, производимого в воде на большом расстоянии (рис. 77).

Хорошо проводит звук земля. Известный историк Н. М. Карамзин сообщает, что Дмитрий Донской перед Куликовской битвой, приложив ухо к земле, услышал топот копыт конницы противника, когда она еще не была видна.

Если приставить вплотную к уху конец длинной деревянной линейки и слегка постукивать по другому ее концу ручкой, то отчетливо слышен звук. Отодвинув же линейку немного от уха, вы обнаружите, что звук почти перестает быть слышимым.

В вакууме звуковые волны распространяться не могут. Для доказательства этого электрический звонок нужно поместить под колокол воздушного насоса (рис. 78). По мере того как давление воздуха под колоколом уменьшается, звук ослабевает, пока не прекращается совсем.

Плохо проводят звук такие материалы, как войлок, пористые панели, прессованная пробка и т. д. Эти материалы используют для звукоизоляции, т. е. для защиты помещений от проникновения в них посторонних звуков.

Значение звука. Для того чтобы уверенно ориентироваться в мире, наш мозг должен получать информацию о том, что происходит вокруг нас. Зрение и слух играют в этом главную роль. Осязание, обоняние и вкусовые ощущения менее существенны.

Конечно, наибольшее количество информации мы получаем с помощью света. Испущенный источниками (Солнцем, лампой

и т. д.) свет отражается от окружающих предметов и, попадая в глаз, позволяет судить об их положении и движении. Многие предметы светятся сами.

Отраженные от предметов звуковые волны или волны, испускаемые звучащими предметами, также дают нам сведения об окружающем мире. Но главное — это речь. Мы создаем и воспринимаем звуковые волны и тем самым общаемся друг с другом.

Прослушивая с помощью специальных устройств, например медицинского фонендоскопа (рис. 79), звуки в организме, можно получать важные сведения о работе сердца и других внутренних органов.

§ 42. СКОРОСТЬ ЗВУКА

Звуковые волны, подобно всем другим волнам, распространяются с конечной скоростью. Обнаружить это можно так. Свет распространяется с огромной скоростью — 300 000 км/с. Поэтому вспышка от выстрела почти мгновенно достигает глаз. Звук же выстрела приходит с заметным запаздыванием. То же самое можно заметить, наблюдая с большого расстояния игру в футбол. Вы видите удар по мячу, а звук от удара приходит спустя некоторое время. Все, вероятно, замечали, что вспышка молнии предшествует раскату грома. Если гроза далеко, то запаздывание грома достигает нескольких десятков секунд. Наконец, из-за конечной скорости звука появляется эхо. Эхо — это звуковая волна, отраженная от опушки леса, крутого берега, здания и т. д.

Скорость звука в воздухе при 0 °С равна 331 м/с. Эта скорость довольно велика. Лишь совсем недавно самолеты начали летать со скоростями, превышающими скорость звука.

Скорость звука в воздухе не зависит от его плотности. Она приблизительно равна средней скорости теплового движения

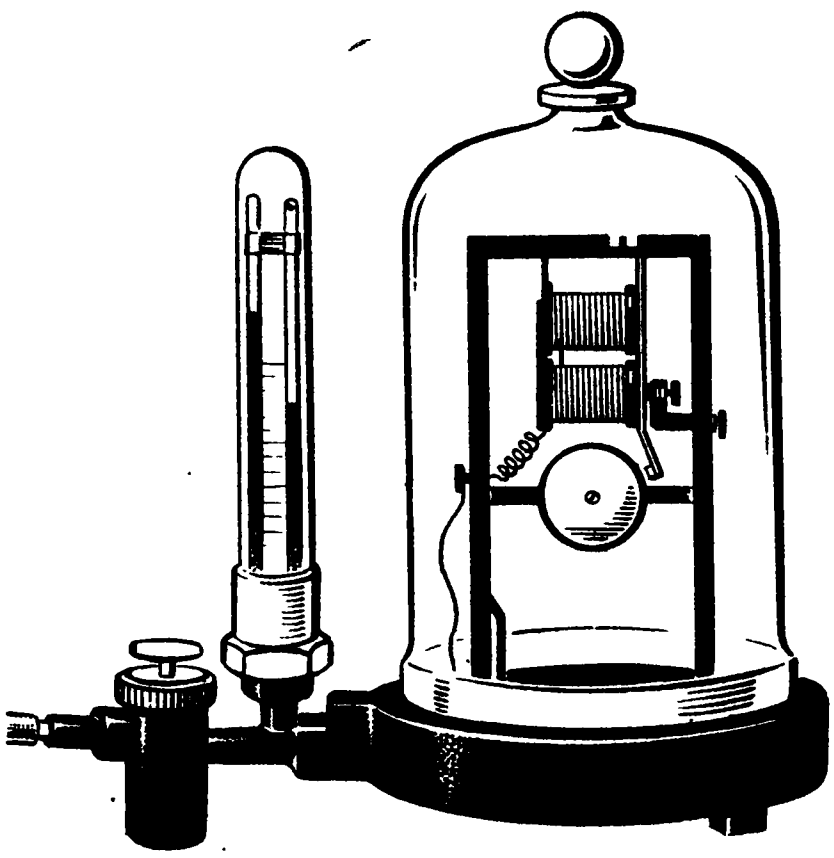


Рис. 78

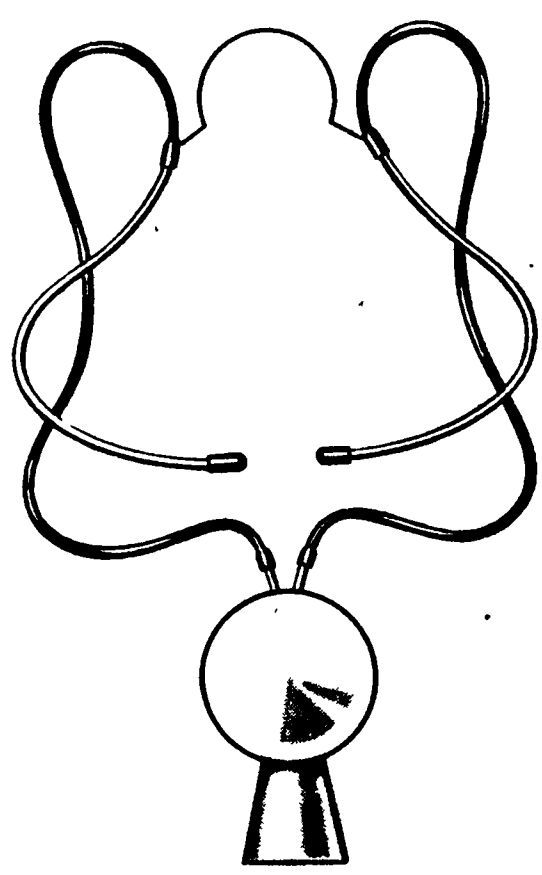


Рис. 79

молекул и, подобно ей, пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры. Чем больше масса молекул газа, тем меньше скорость звука в нем. Так, при 0 °С скорость звука в водороде 1270 м/с, а в углекислом газе — 258 м/с.

В воде скорость звука больше, чем в воздухе. Впервые она была измерена в 1827 г. на Женевском озере в Швейцарии. На одной лодке поджигали порох и одновременно ударяли в подводный колокол (рис. 80а). Другая лодка находилась на расстоянии 14 км от первой. Звук улавливался с помощью рупора, опущенного в воду (рис. 80б). По разности времени между вспышкой света и приходом звукового сигнала определили скорость звука. При температуре 8 °С скорость звука в воде равна 1435 м/с.

В твердых телах скорость звука еще больше, чем в жидкостях. Например, в стали скорость звука при 15 °С равна 4980 м/с. Что скорость звука в твердом теле больше, чем в воздухе, можно обнаружить так. Если ваш помощник ударит по одному концу рельса, а вы приложите ухо к другому концу, то будут слышны два удара. Сначала звук достигает уха по рельсам, а затем по воздуху.

По известной частоте колебаний и скорости звука в воздухе можно вычислить длину звуковой волны (см. § 39). Самые длинные волны, воспринимаемые ухом, имеют длину $\lambda \approx 17$ м, а самые короткие — длину $\lambda \approx 17$ мм.

§ 43. МУЗЫКАЛЬНЫЕ ЗВУКИ И ШУМЫ. ГРОМКОСТЬ И ВЫСОТА ЗВУКА

Звуки, которые мы слышим каждый день, очень разнообразны. Любой из нас отличает так называемые музыкальные звуки от шумов. К первым относится пение, звучание натянутых струн музыкальных инструментов, свист и т. д. Шумы возникают при

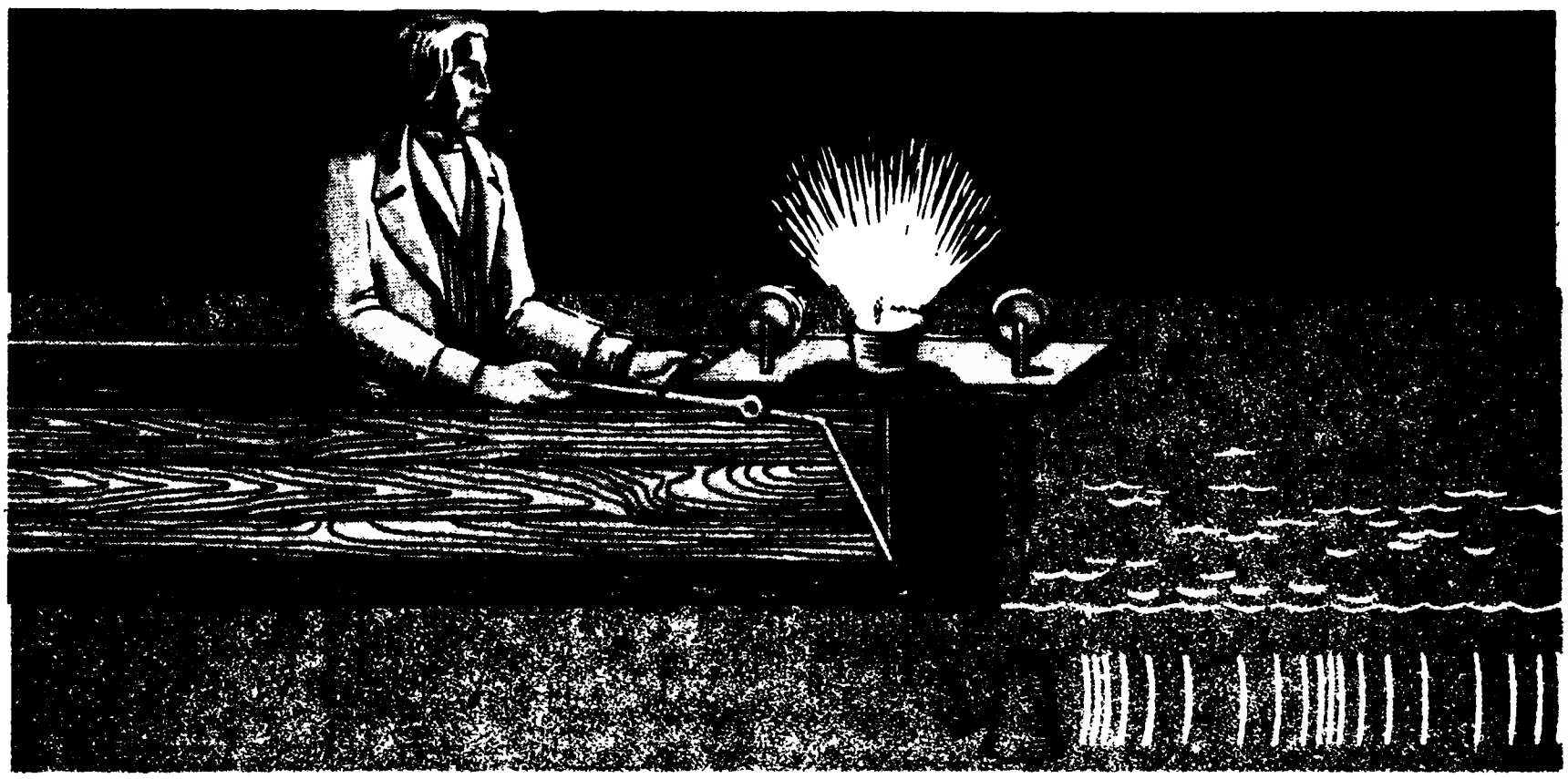


Рис. 80 а

взрывах, работе двигателей внутреннего сгорания, шипении змеи, скрипе несмазанных дверных петель и т. д. Мы в состоянии с помощью своих органов речи воспроизвести более или менее гармоничный звук и, конечно, шум.

Музыкальные звуки. Но чем с точки зрения физики отличаются музыкальные звуки от шума и по какой причине столь несхожими могут быть музыкальные звуки между собой?

Чистый музыкальный звук можно получить с помощью простого прибора, называемого *камертоном*. На рисунке 81 показан камертон, который закреплен на деревянном ящике, открытом с одной стороны. Ударив молоточком по одной из ветвей камертона, мы услышим музыкальный звук. Постепенно звук ослабевает вследствие затухания колебаний ветвей. Звуковая волна возбуждается колеблющимися ветвями камертона. Характер этих колебаний можно установить, если прикрепить к ветви камертона иглу и провести ею с постоянной скоростью по поверхности закопченной стеклянной пластинки. На пластинке появится линия, очень близкая к синусоиде (рис. 82). Это *временна́я развертка* колебаний, подобная той, которую получают с помощью маятника с песочницей. Отсюда можно заключить, что колебания ветвей камертона очень близки к гармоническим.

Звук, издаваемый гармонически колеблющимся телом, называют музыкальным тоном или просто тоном.

Музыкальные тоны отличаются на слух громкостью и высотой.

Громкость звука. Громкость звука определяется амплитудой колебаний. Чем сильнее удар молоточка по камертону, тем громче звучит камертон. А более сильный удар вызывает колебания большей амплитуды. Можно не сомневаться, что и громкость любого звука определяется амплитудой колебаний в звуковой волне.

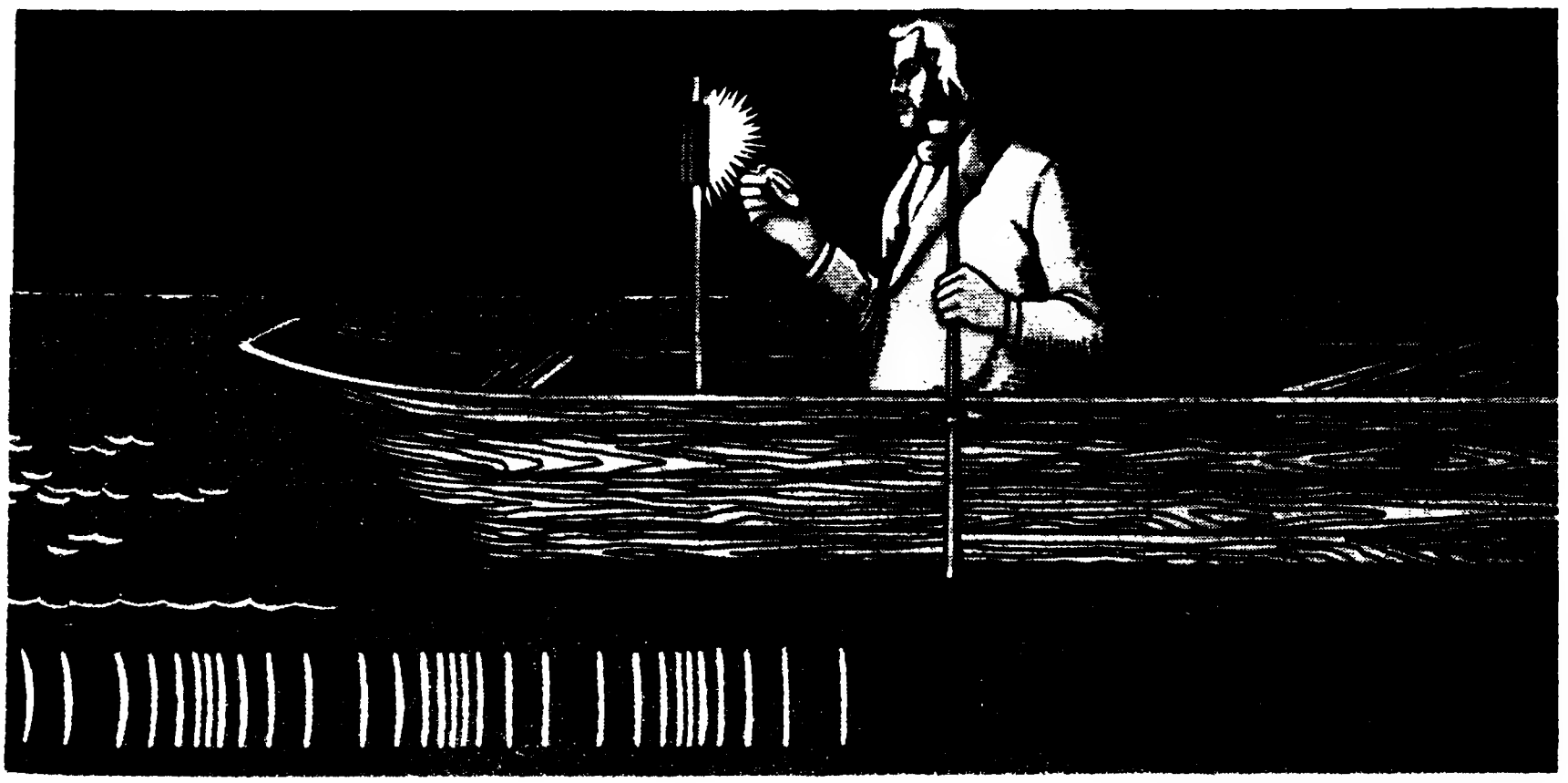


Рис. 80 б

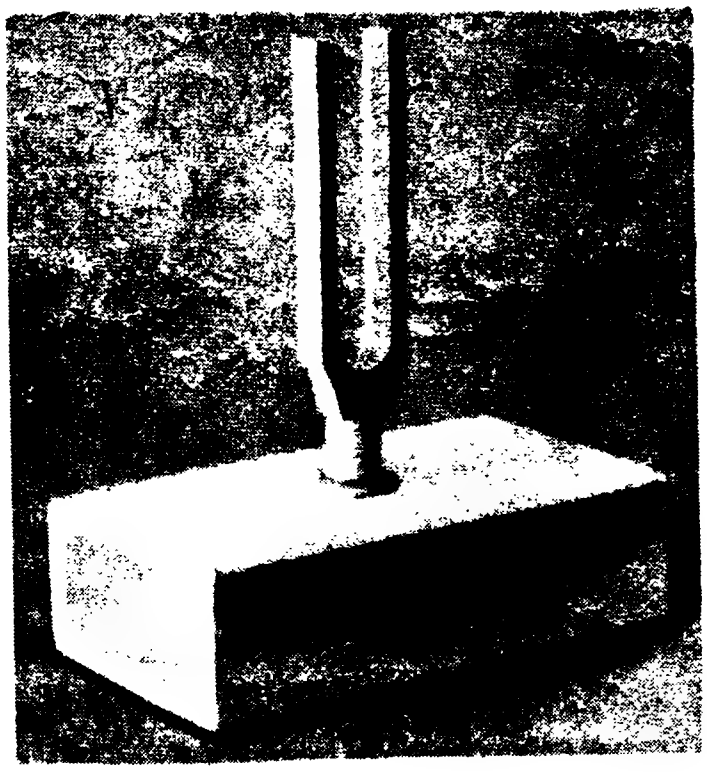


Рис. 81

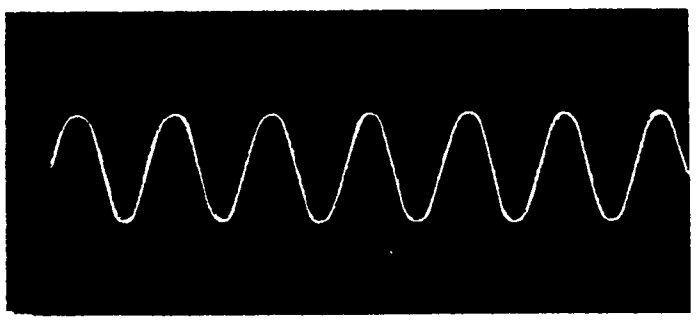


Рис. 82

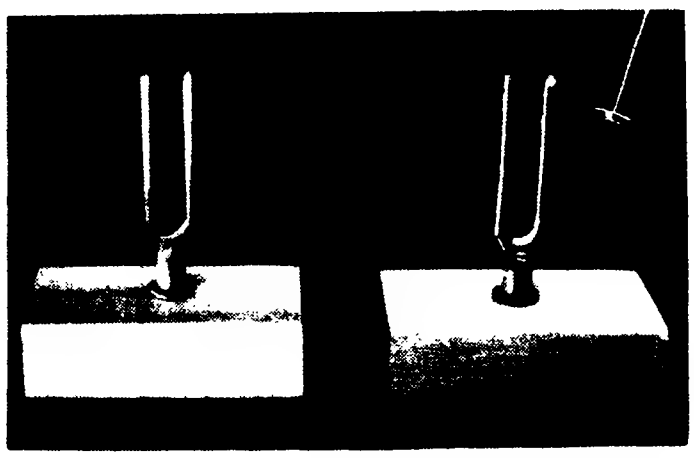


Рис. 83

Нужно, однако, иметь в виду, что чувствительность нашего уха зависит от частоты звука. Звуковые колебания одинаковых амплитуд не кажутся нам одинаково громкими, если частоты их различны. Наше ухо наиболее чувствительно к колебаниям с частотой около 3500 Гц.

Высота звука. Для того чтобы определить, с чем связана определенная *высота звука,* нужно располагать несколькими камертонами различной величины. Проводя иглой, прикрепленной к ветви звучащего камертона, вдоль закопченной пластинки, можно заметить, что, чем выше звук, издаваемый камертоном, тем меньше период появляющейся на пластинке синусоиды и, следовательно, тем больше частота колебаний камертона. **Высота звука определяется частотой колебаний.**

То же самое можно наблюдать при колебаниях струны. Увеличение натяжения струны приводит к увеличению частоты свободных колебаний. Поэтому, натягивая струны гитары с помощью колышков, мы делаем звук более высоким.

Что такое шум! Шум отличается от музыкального тона тем, что ему не соответствуют какая-либо определенная частота колебаний и, следовательно, определенная высота звука. В шуме присутствуют колебания всевозможных частот.

§ 44. АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Звучащее тело может совершать как свободные, так и вынужденные колебания под действием внешней периодической силы. Когда частота внешней силы совпадает с собственной частотой колебаний, наступает резонанс.

Проще всего наблюдать *акустический резонанс* с помощью двух

одинаковых камертонов. Расположим камертоны на небольшом расстоянии так, чтобы отверстия ящиков были направлены друг к другу (рис. 83). Ударив молоточком по ветви одного камертона, мы обнаружим вскоре, что и второй камертон начинает звучать. Звуковая волна от первого камертона создает периодическую силу, действующую на второй камертон. Собственные частоты камертонов одинаковы, и амплитуда колебаний второго камертона оказывается достаточно большой. Если же взять камертоны с различными собственными частотами, то второй камертон при возбуждении первого практически звучать не будет. Достаточно прикрепить к ветви одного из двух одинаковых камертонов легкую скобочку, как уже резонанс не возникает.

Затухание колебаний камертона мало, и поэтому резонансная кривая является очень острой (см. § 14).

§ 45. УЛЬТРАЗВУК

При частотах ниже 17 и выше 20 000 Гц колебания давления уже не воспринимаются человеческим ухом. Продольные волны с частотой колебаний ниже 17 Гц получили название *инфразвука.* Инфразвук пока мало применяется в технике. Продольные волны с частотой, превышающей 20 000 Гц, называются *ультразвуком.* Ультразвук применяется в технике и играет большую роль в жизни многих животных. Летучие мыши, киты, дельфины и некоторые насекомые излучают и улавливают ультразвук.

Для получения ультразвука большой интенсивности пользуются тем, что некоторые кристаллы (кварц, сегнетова соль, турмалин) в электрическом поле меняют свои размеры: в зависимости от направления поля они сжимаются или растягиваются.

Кварцевая пластина, помещенная внутрь плоского конденсатора, к которому приложено переменное напряжение, совершает вынужденные колебания. Любое упругое тело, в том числе и кварцевая пластина, обладает собственными частотами. При совпадении частоты переменного электрического поля с собственной частотой кварцевой пластины наступает резонанс и амплитуда колебаний сильно возрастает. Такая пластина в воде может излучать волны мощностью до нескольких киловатт с каждого квадратного сантиметра поверхности. Существенно, что с помощью коротких волн можно создать остронаправленные пучки, незначительно расширяющиеся по мере распространения.

Мощная ультразвуковая волна способна дробить тела, помещенные в жидкость (кусочки металла превращаются в тонкую взвесь). Ультразвук оказывает сильное биологическое воздействие. Микробы в поле ультразвука погибают. С помощью ультразвука можно стерилизовать молоко и другие продукты.

В жидкостях ультразвуковые волны затухают слабее, чем в воздухе. Поэтому ультразвук применяется в *гидроакустике.* Наиболее важным прибором в гидроакустике является *эхолот,* или

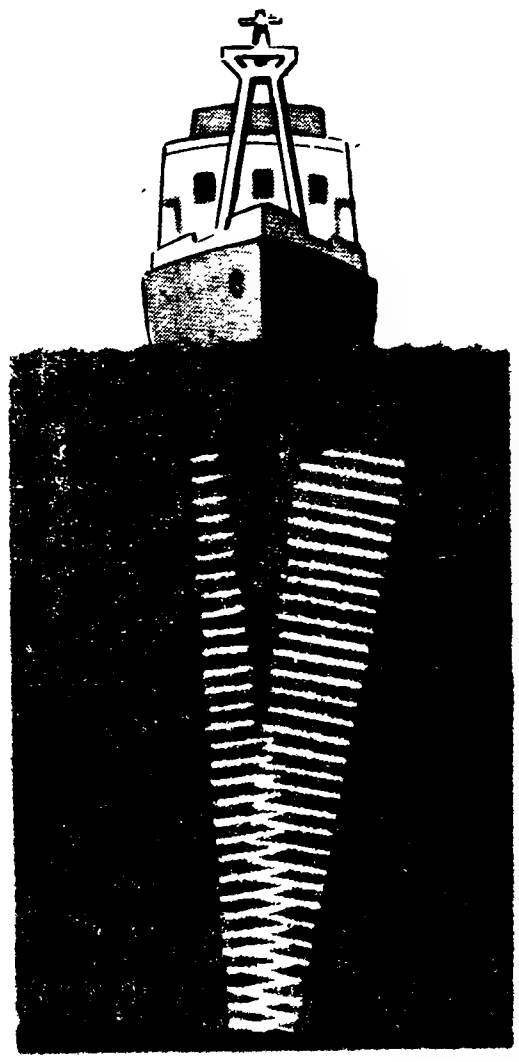


Рис. 84

гидролокатор. Посылая короткие импульсы ультразвуковых волн, можно уловить их отражения от дна или других твердых предметов. По времени запаздывания отраженного сигнала можно судить о расстоянии до препятствия. Так измеряют глубину моря (рис. 84), обнаруживают косяки рыб, встречный айсберг или подводную лодку. С помощью эхолота советскими учеными был открыт подводный хребет в Северном Ледовитом океане.

По отражению ультразвука от раковины или трещины в металлической отливке можно судить о дефектах в изделиях.

Чрезвычайно совершенные ультразвуковые локаторы имеют дельфины и летучие мыши. Дельфины в мутной воде уверенно ориентируются, посылая ультразвуковые импульсы и улавливая их отражения от предметов или добычи.

В полной темноте летучие мыши способны летать в комнате, в которой по всевозможным направлениям натянуто множество веревок, не задевая их. Уши с успехом заменяют им глаза. Летучая мышь испускает импульсы ультразвуковых колебаний. Частота колебаний в импульсе составляет 25 000—50 000 Гц. Длительность каждого импульса не превышает 0,015 с.

?

1. **Какую волну называют плоской? сферической?**
2. **Почему в газах и жидкостях не существует поперечных волн?**
3. **Какие колебания называют акустическими?**
4. **От чего зависит скорость звука в воздухе?**
5. **Чем определяется громкость звука и его высота?**

§ 46. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

Сложение волн. До сих пор мы имели дело с одной волной, распространяющейся от источника. Однако очень часто в среде одновременно распространяется несколько различных волн. Например, когда в комнате беседуют несколько человек, то отдельные звуковые волны накладываются друг на друга. Что при этом происходит?

Проще всего проследить за этим явлением, наблюдая волны на поверхности воды. Если мы бросим в воду два камня, создав этим две кольцевые волны, то нетрудно заметить, что каждая волна проходит сквозь другую и ведет себя в дальнейшем так, будто другой волны совсем не существовало. Точно так же любое число звуковых волн может одновременно распространяться в воздухе, ничуть не мешая друг другу. Множество музыкальных инструментов в оркестре или голосов в хоре создают звуко-

вые волны, одновременно улавливаемые нашим ухом. Причем ухо в состоянии отличить один звук от другого.

Теперь посмотрим более внимательно, что происходит в местах, где волны накладываются друг на друга. Наблюдая волны на поверхности воды от двух камней, мы убедимся, что некоторые участки поверхности не возмущены, в других же местах возмущение усилилось.

Если две волны встречаются в одном месте гребнями, то в этом месте возмущение воды усиливается.

Если же, напротив, гребень одной волны встречается с впадиной другой, то возмущения поверхности воды не будет.

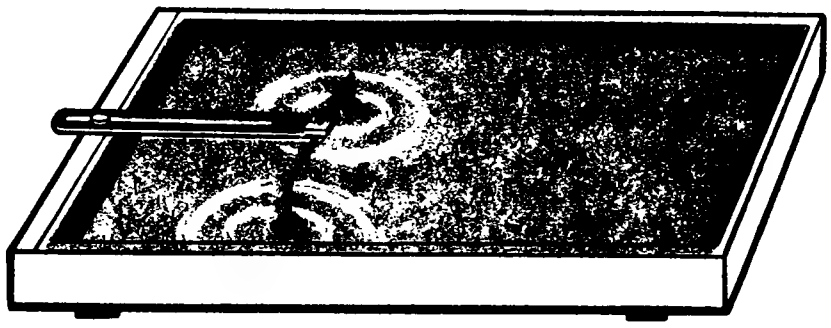


Рис. 85

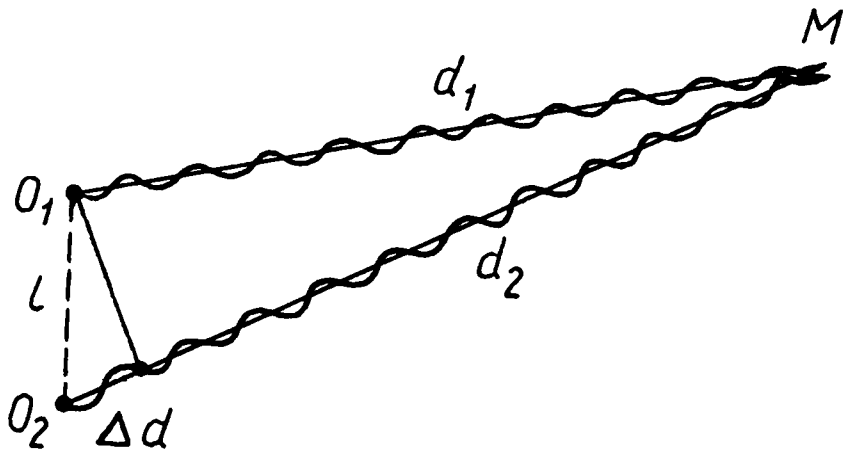


Рис. 86

Вообще же **в каждой точке среды колебания, вызванные двумя волнами, складываются. Результирующее смещение любой частицы среды представляет собой сумму смещений, которые происходили бы при распространении одной из волн в отсутствие другой.**

Интерференция. Сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуды результирующих колебаний в различных точках пространства, называется интерференцией.

Выясним, при каких условиях имеет место интерференция волн. Для этого рассмотрим более подробно наложение волн на поверхности воды.

Можно одновременно возбудить две круговые волны в ванне с помощью двух шариков, укрепленных на стержне, который совершает гармонические колебания (рис. 85). В любой точке M на поверхности воды (рис. 86) будут складываться колебания, вызванные двумя волнами (от источников O_1 и O_2). Амплитуды колебаний, вызванных в точке M обеими волнами, будут, вообще говоря, отличаться, так как волны проходят различные пути d_1 и d_2. Но если расстояние l между источниками много меньше этих путей ($l \ll d_1$ и $l \ll d_2$), то обе амплитуды можно считать практически одинаковыми.

Результат сложения волн, приходящих в точку M, будет зависеть от разности фаз между ними. Пройдя различные расстояния d_1 и d_2, волны имеют разность хода $\Delta d = d_2 - d_1$. Если разность хода равна длине волны λ, то вторая волна будет запаздывать по сравнению с первой ровно на один период (как раз за период волна проходит путь, равный длине волны). Следо-

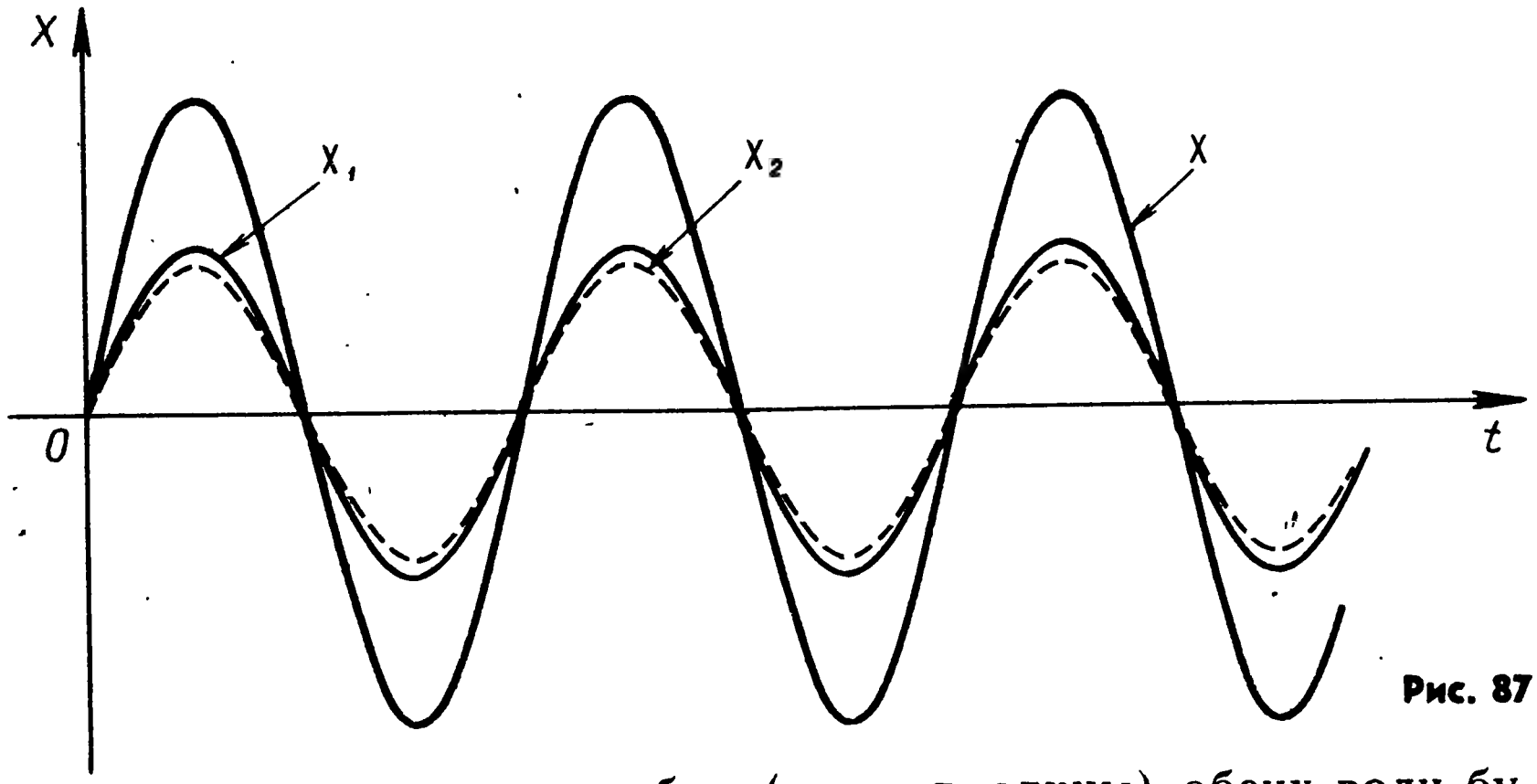


Рис. 87

вательно, в этом случае гребни (как и впадины) обеих волн будут совпадать.

Условие максимумов. На рисунке 87 изображена зависимость от времени смещений x_1 и x_2, вызванных двумя волнами при $\Delta d = \lambda$. Разность фаз колебаний равна нулю (или, что то же самое, 2π, так как период синуса равен 2π). В результате сложения этих колебаний возникает результирующее колебание x с удвоенной амплитудой То же самое будет происходить, если на отрезке Δd укладывается не одна, а любое целое число длин волн.

Амплитуда колебаний среды в данной точке будет максимальной, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна целому числу длин волн [1]:

$$\Delta d = k\lambda, \qquad (4.3)$$

где $k = 0, 1, 2, \ldots$.

Условие минимумов. Теперь посмотрим, что будет, когда на отрезке Δd укладывается половина длины волны. Очевидно, что вторая волна будет отставать от первой на половину периода. Разность фаз окажется равной π, т. е. колебания будут происходить в противофазе. В результате сложения этих колебаний амплитуда результирующего колебания равна нулю и в рассматриваемой точке колебаний нет (рис. 88). То же самое произойдет, если на отрезке укладывается любое нечетное число полуволн.

[1] Это справедливо лишь при условии, что фазы колебаний обоих источников совпадают.

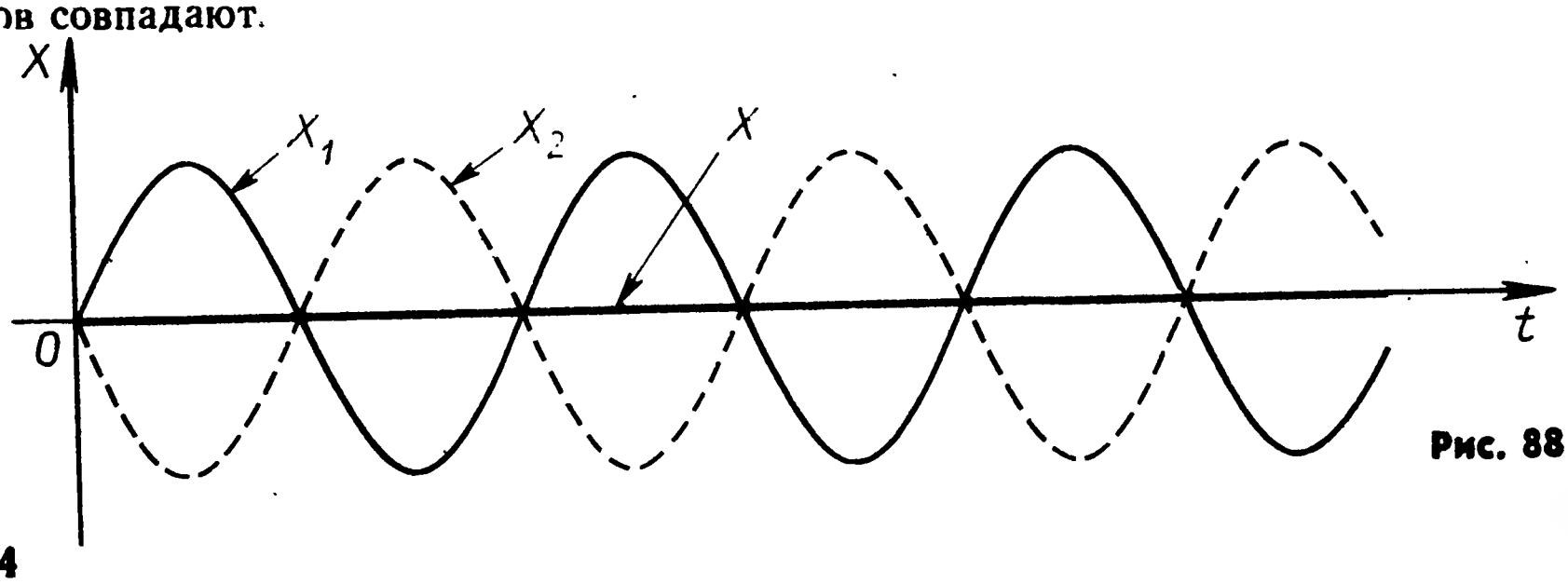


Рис. 88

Амплитуда колебаний среды в данной точке будет минимальной, если разность хода двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, равна нечетному числу полуволн:

$$\Delta d = (2k + 1)\,\frac{\lambda}{2}. \qquad (4.4)$$

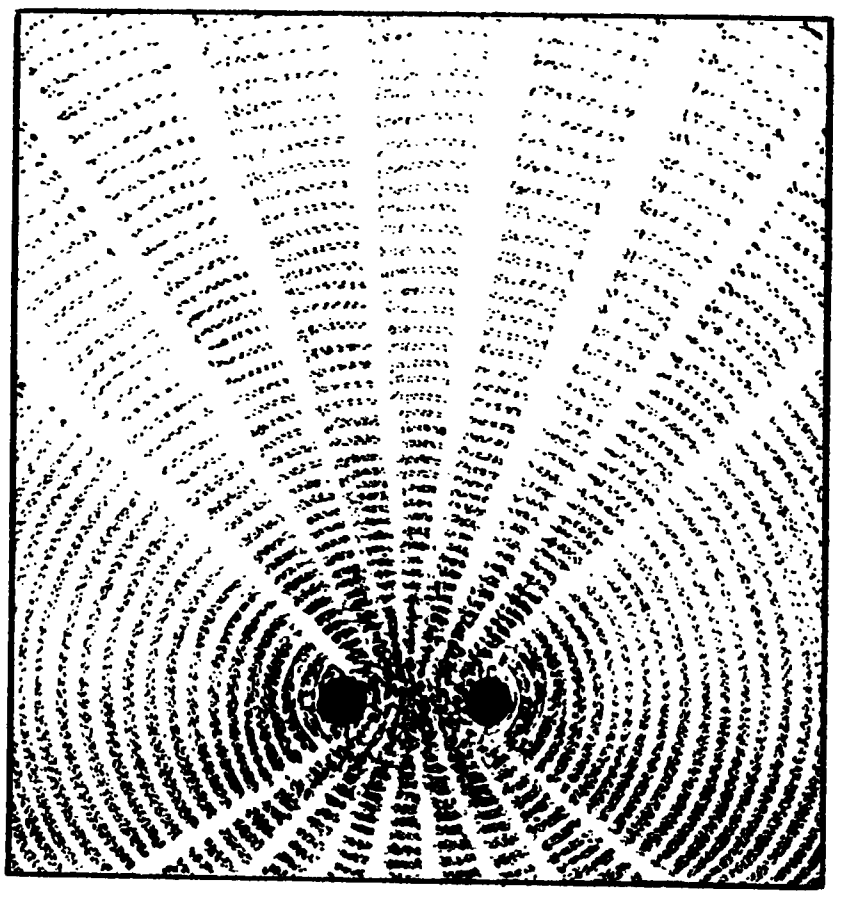


Рис. 89

Если разность хода $d_2 - d_1$ принимает промежуточное значение между λ и $\frac{\lambda}{2}$, то и амплитуда результирующего колебания принимает некоторое промежуточное значение между удвоенной амплитудой и нулем. Но наиболее важно то, что **амплитуда колебаний в любой точке не меняется с течением времени.** На поверхности воды возникает определенное распределение амплитуд колебаний, которое называют *интерференционной картиной* (рис. 89).

Когерентные волны. Для получения устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы источники волн имели одинаковую частоту и фазы их колебаний совпадали или отличались на некоторую постоянную (не зависящую от времени) величину. Иначе говоря, разность фаз колебаний обоих источников должна оставаться неизменной. Источники, удовлетворяющие этим условиям, называются *когерентными.* Когерентными называют и созданные ими волны.

Только при сложении когерентных волн образуется устойчивая интерференционная картина.

Если же разность фаз колебаний источников не остается постоянной, то в любой точке среды будет меняться разность фаз колебаний, возбуждаемых двумя волнами. Поэтому амплитуда результирующих колебаний будет меняться с течением времени. В результате максимумы и минимумы перемещаются в пространстве и интерференционная картина размывается.

Интерференция присуща волновым процессам любой природы. Можно, в частности, наблюдать интерференцию звука. Большое значение интерференции состоит в том, что **если при изучении какого-либо процесса будет обнаружена интерференция, то это служит неоспоримым доказательством того, что мы имеем дело с волновым движением.**

Распределение энергии при интерференции. Волны несут энергию. Что же с этой энергией происходит при гашении волн друг другом? Может быть, она превращается в другие формы и в минимумах интерференционной картины выделяется тепло? Ни-

чего подобного. Наличие минимума в данной точке интерференционной картины означает, что энергия сюда не поступает совсем. **Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве.** Она не распределяется равномерно по всем частицам среды, а концентрируется в максимумах за счет того, что в минимумы совсем не поступает.

§ 47. ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ ВОЛН

Пока что мы знакомились с волнами, распространяющимися в однородной среде. Теперь посмотрим, что происходит с волнами при встрече с препятствием, например с твердой стенкой.

Общий принцип, описывающий поведение волн, впервые был выдвинут современником Ньютона, голландским ученым Христианом Гюйгенсом. Согласно принципу Гюйгенса **каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн.** Для того чтобы, зная положение волновой поверхности в момент времени t, найти ее положение в следующий момент времени $t+\Delta t$, нужно каждую точку волновой поверхности рассматривать как источник вторичных волн. **Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени** (рис. 90). Этот принцип в равной мере пригоден для описания распространения любых волн: звуковых, световых и т. д.

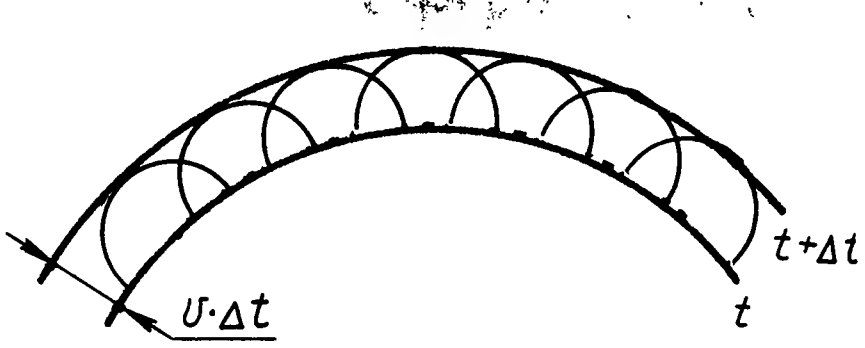


Рис. 90

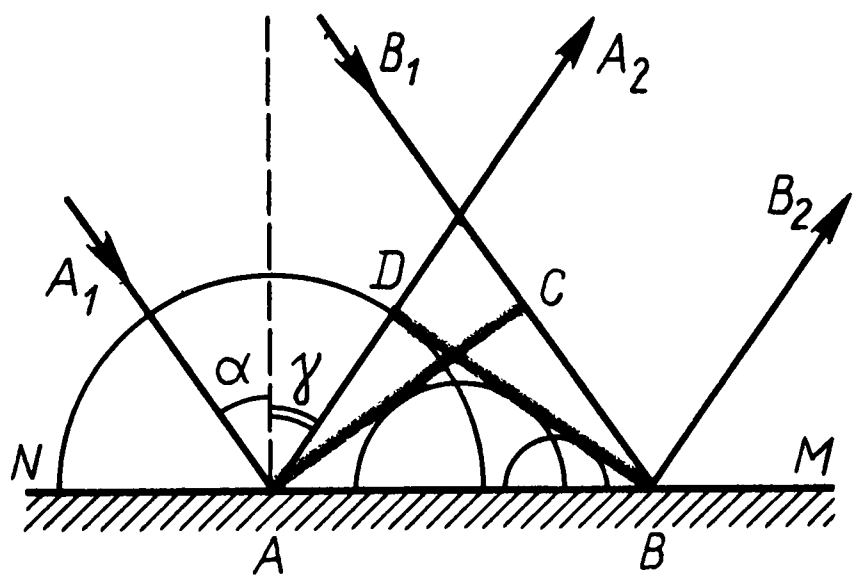


Рис. 91

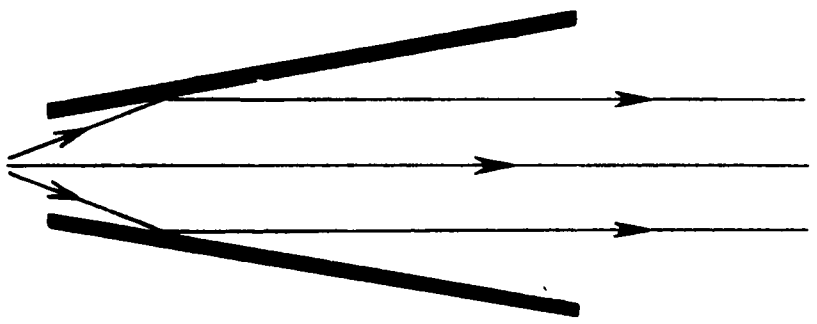


Рис. 92

Для механических волн принцип Гюйгенса имеет наглядное истолкование: частицы среды, до которых доходят колебания, в свою очередь, колеблясь, приводят в движение соседние частицы среды, с которыми они взаимодействуют.

С помощью принципа Гюйгенса можно найти закон, которому подчиняются волны при отражении от поверхности раздела двух сред.

На рисунке 91 вы видите плоскую волну, падающую на поверхность MN. Прямые A_1A

Христиан Гюйгенс (1629—1695) — выдающийся голландский физик и математик, создатель первой волновой теории света. Основы этой теории Гюйгенс изложил в «Трактате о свете» (1690). Гюйгенс впервые использовал маятник для достижения регулярного хода часов и вывел формулу для периода колебаний математического и физического маятников. Математические работы Гюйгенса касались исследования конических сечений, циклоиды и других кривых. Ему принадлежит одна из первых работ по теории вероятности (трактат «О расчетах при игре в кости»). С помощью усовершенствованной им астрономической трубы Гюйгенс открыл спутник Сатурна Титан и установил, что кольцо Сатурна нигде не касается поверхности этой планеты.

и B_1B — два луча этой волны. Они параллельны друг другу. Плоскость AC — волновая поверхность падающей волны.

Угол α между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения называют *углом падения*.

Волновую поверхность отраженной волны можно получить, если провести огибающую вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела сред. Различные участки волновой поверхности AC достигнут отражающей границы неодновременно. Следовательно, возбуждение колебаний в точке A начнется раньше, чем в точке B, на время $\tau = \frac{|CB|}{v}$ (где v — скорость волны).

В момент, когда волна достигнет точки B и в этой точке начнется возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке A уже будет представлять собой полусферу с радиусом $R = |AD| = \tau v = |CB|$. Радиусы вторичных волн от источников, расположенных между точками A и B, меняются так, как показано на рисунке 91. Огибающей вторичных волн является плоскость DB, касательная к сферическим поверхностям. Она представляет собой волновую поверхность отраженной волны. Отраженные лучи AA_2 и BB_2 перпендикулярны волновой поверхности DB. Угол γ между перпендикуляром к отражающей поверхности и отраженным лучом называют *углом отражения*.

Так как $|AD| = |CB|$ и треугольники ADB и ACB прямоугольные, то $\angle DBA = \angle CAB$. Но $\alpha = \angle CAB$ и $\gamma = \angle DBA$ как углы с перпендикулярными сторонами. Следовательно, **угол отражения равен углу падения** [1]:

$$\alpha = \gamma. \qquad (4.5)$$

Кроме того, как вытекает из построения Гюйгенса, **падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восставленный в точке**

[1] Здесь и в дальнейшем в алгебраических соотношениях под словом *угол* подразумевается величина угла.

падения, лежат в одной плоскости. В этом и состоит *закон отражения волн* [1].

Отражение звука от твердых стенок используется в рупорах — простых устройствах, создающих направленную звуковую волну. Принцип действия рупора понятен из рисунка 92. Благодаря отражению звука от внутренней поверхности по оси рупора распространяется от источника звука более мощная волна, чем в том случае, когда источник не снабжен рупором.

Отражение звука от стен, пола и потолка сильно влияет на слышимость звука в помещениях. Отраженный звук сливается с первоначально произнесенным и в больших помещениях заметно искажает его. Поэтому речь может сделаться малоразборчивой. Мягкая обивка кресел, портьеры уменьшают интенсивность отраженных волн и тем самым заметно влияют на качество звука. Все это учитывают при проектировании зрительных залов. Существует специальная техническая дисциплина — *архитектурная акустика.*

§ 48. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Рассматривая бегущую волну на резиновом шнуре, мы как бы считали, что этот шнур не имеет второго конца. Но конец-то на самом деле есть. Пусть этот конец закреплен на жесткой стенке. Что при этом будет происходить?

Проще всего выяснить это, если послать вдоль шнура единичный импульс, взмахнув один раз рукой, и посмотреть, что произойдет. Изгиб шнура (единичный импульс) добежит до стенки (рис. 93, *а*), отразится и побежит назад (рис. 93, *б*). Причем вследствие затухания величина импульса в процессе его распространения постепенно уменьшается.

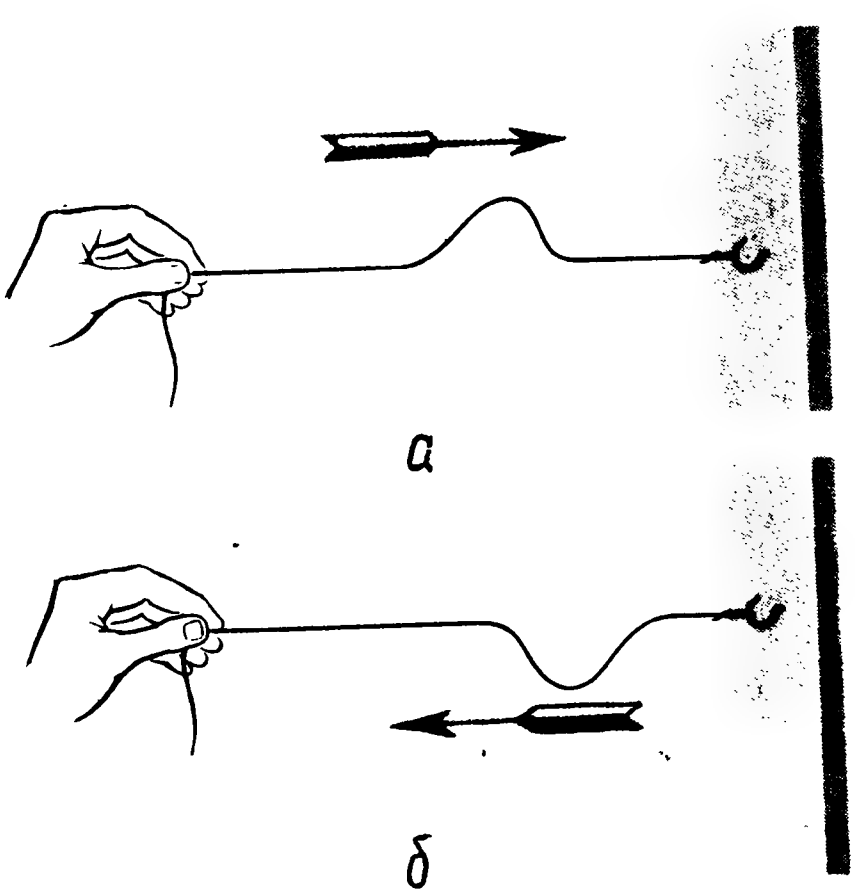


Рис. 93

Если левый (по рисунку) конец шнура заставить совершать гармонические колебания, то по шнуру побежит волна и, достигнув стенки, она будет от нее отражаться. Каждый очередной изгиб шнура отражается подобно единичному импульсу, и от стенки побежит отраженная волна навстречу волне, бегущей к стенке. В результате на любом участке

[1] На границе раздела двух сред волна не только отражается, но и частично проникает во вторую среду, меняя направление своего распространения (преломляясь). Мы это явление пока рассматривать не будем.

шнура встречаются две волны, бегущие в противоположные стороны. Эти волны когерентны, и при их сложении образуется определенная интерференционная картина.

На рисунке 94 пунктирными линиями изображены положения двух волн, бегущих навстречу друг другу, через промежутки времени, равные четверти периода. Стрелками указаны направления распространения обеих волн.

За четверть периода каждая из волн перемещается на $\frac{1}{4}\lambda$. Результирующие колебания точек шнура (сплошная линия) возникают вследствие сложения двух колебаний. Если в некоторой точке складываются колебания с одинаковыми фазами, то смещение этой точки от положения равновесия, вызванное одной волной, прибавляется к такому же смещению, вызванному другой волной. В результате амплитуда колебаний удваивается. Такие точки называются *пучностями*.

Если же в какой-нибудь точке шнура складываются колебания с противоположными фазами, то точка эта остается в покое. Смещения точки, вызванные падающей и отраженной волнами, направлены в противоположные стороны и вычитаются друг из друга. Такие точки называются *узлами*. На рисунке 94 вертикальные линии проведены через узлы. Пучности лежат посредине между узлами.

Самое примечательное состоит в том, что **узлы и пучности не перемещаются вдоль шнура.** Это происходит потому, что разность фаз двух колебаний в пучностях и узлах (как и во всех других точках) не меняется со временем. Она зависит только от положения точки на шнуре. В результате распределение смещений точек шнура относительно их положений равновесия в любой момент времени образует волну, которая не перемещается в

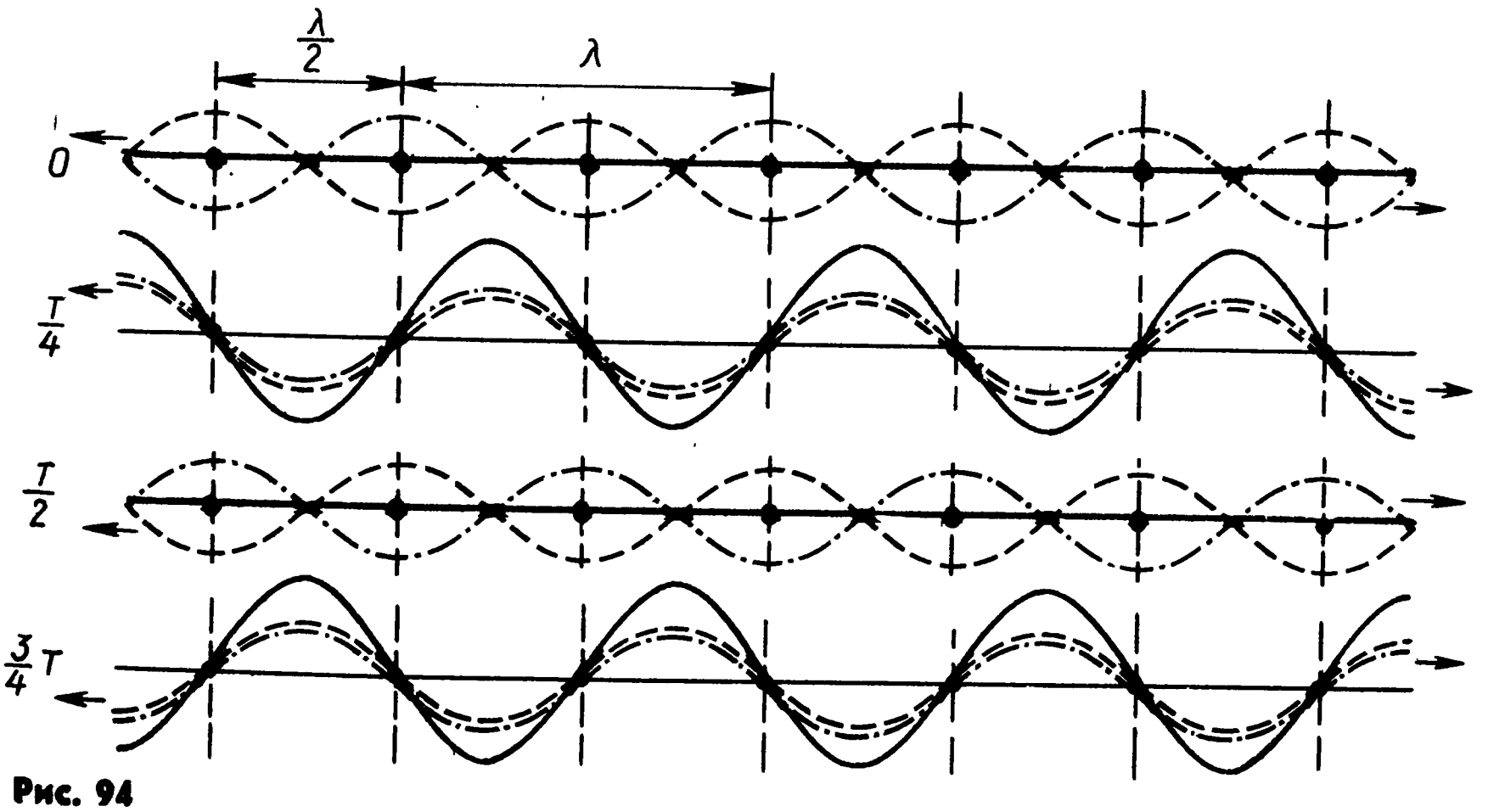


Рис. 94

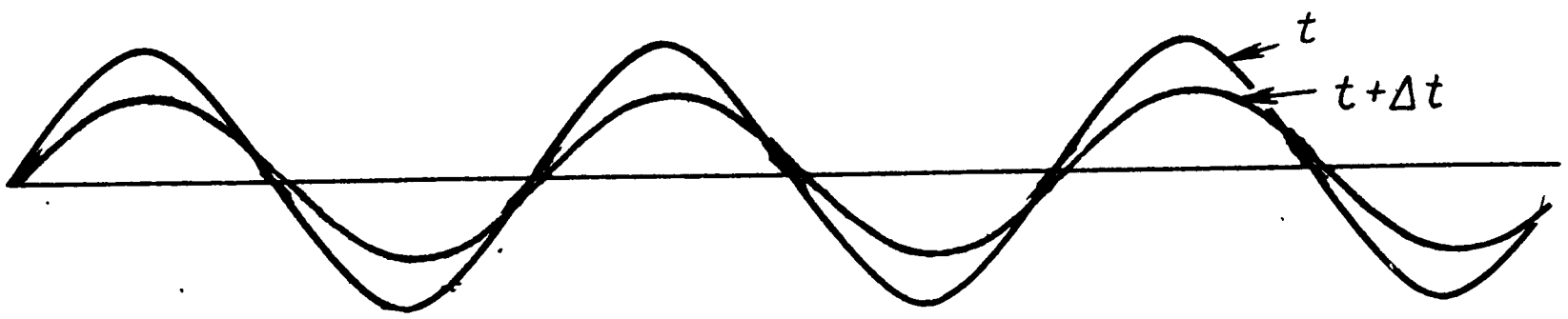


Рис. 95

пространстве. Такая волна называется *стоячей волной.* **Расстояние между соседними узлами (или пучностями),** как хорошо видно на рисунке 94, **равно половине длины волны.**

Фазы колебаний всех точек между двумя соседними узлами в стоячей волне одинаковы. Это означает, что смещение точек между соседними узлами происходит в любой момент времени в одну и ту же сторону. Но при переходе через узел фаза колебаний меняется на π, т. е. смещения меняют свой знак на противоположный. На рисунке 95 вы видите профиль стоячей волны в близкие моменты времени t и $t+\Delta t$.

Таким образом, если в бегущей волне точки шнура колеблются с одинаковой амплитудой, но с различными фазами, то в стоячей волне фаза колебаний точек между двумя соседними узлами одна и та же, но амплитуда меняется от точки к точке (увеличивается от узла к пучности и уменьшается от пучности к следующему узлу).

В справедливости сделанных выводов можно убедиться на опыте. При небольшой сноровке нетрудно получить стоячую волну на резиновом шнуре или просто на веревке. (Конечно, стоячая волна не возникнет сразу, как только вы начнете раскачивать веревку. В первый момент отраженной волны вообще не будет. Нужно немного подождать, пока процесс установится.) Можно заметить, что действительно узлы и пучности остаются на местах и фаза колебаний всех точек, расположенных между соседними узлами, одна и та же и участки шнура между узлами одновременно движутся либо вверх, либо вниз.

В стоячей волне, в отличие от бегущей, не происходит переноса энергии. Бегущие навстречу друг другу волны несут одинаковую энергию в противоположных направлениях. Энергия колебания между двумя узлами остается неизменной. Совершается только превращение кинетической энергии в потенциальную и, наоборот, потенциальной в кинетическую.

Когда участки шнура проходят через положение равновесия, кинетическая энергия имеет максимальное значение. Через четверть периода кинетическая энергия убывает до нуля и максимальной становится потенциальная энергия. Отклонения частиц шнура в этот момент от их положений равновесия максимальны (шнур при этом более всего деформирован в узлах и менее всего в пучностях).

§ 49. ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

Рассматривая в § 47 отражение волн, мы молчаливо предполагали, что отражающая поверхность очень велика. Однако очень часто волна встречает на своем пути небольшие (по сравнению с длиной волны) препятствия. Соотношение между длиной волны и размером препятствий определяет в основном поведение волны.

Волны способны огибать препятствия. Так, морские волны свободно огибают выступающий из воды камень, если его размеры меньше длины волны или сравнимы с ней. За камнем волны распространяются так, как если бы его не было совсем (маленькие камни на рисунке 96). Точно так же волна от брошенного в пруд камня огибает торчащий из воды прутик. Только препятствие большого по сравнению с длиной волны размера (большой камень на рисунке 96) дает за собой тень: волны за него не проникают.

Способностью огибать препятствия обладают и звуковые волны. Вы можете слышать сигнал машины за углом дома, когда самой машины не видно. В лесу деревья заслоняют ваших товарищей. Чтобы их не потерять, вы начинаете кричать. Звуковые волны, в отличие от света, свободно огибают стволы деревьев и доносят ваш голос до товарищей.

Отклонение от прямолинейного распространения волн, огибание волнами препятствий называется дифракцией (от латинского слова difractus — разломанный). Дифракция присуща любому волновому процессу в той же мере, как и интерференция.

Очень наглядно можно проследить за явлением дифракции волн на поверхности воды, если поставить на пути волн экран с узкой щелью, размеры которой меньше длины волны (рис. 97). Хорошо видно, что за экраном распространяется круговая волна, как если бы в отверстии экрана располагалось колеблющееся тело — источник волн. Согласно принципу Гюйгенса так и должно быть. Вторичные источники в узкой щели располагаются столь близко друг к другу, что их можно рассматривать как один точечный источник.

Если размеры щели велики по сравнению с длиной волны, то картина распространения волн за экраном совершенно иная (рис. 98). Волна проходит сквозь щель, почти не меняя своей формы. Только по краям можно заметить небольшие искривления волновой поверхности, благодаря которым волна частично проникает и в пространство за экраном.

Рис. 96

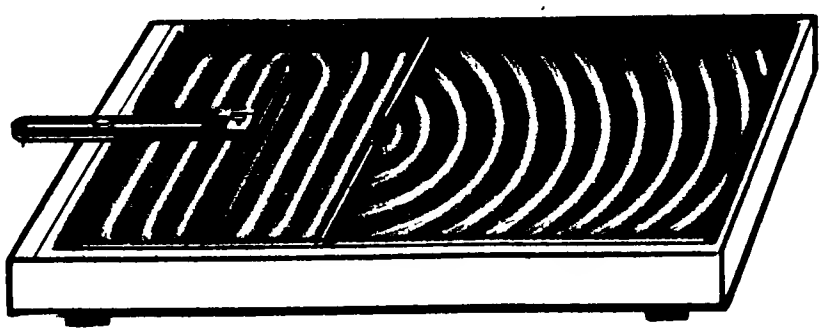


Рис. 97

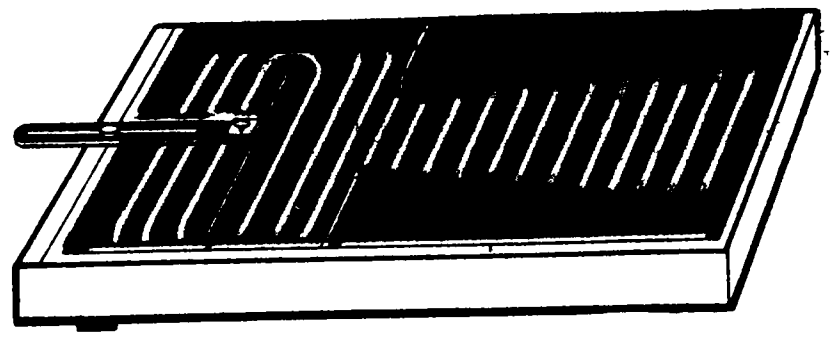


Рис. 98

Принцип Гюйгенса в его первоначальной формулировке позволяет понять, почему происходит дифракция. Вторичные волны, испускаемые участками среды, проникают за края препятствия, расположенного на пути распространения волны. Однако, исходя из приведенной выше формулировки принципа Гюйгенса, нельзя было объяснить дифракцию во всех деталях. Этот принцип нуждался в уточнении, которое и было сделано французским ученым О. Френелем в начале XIX века. Согласно идее Френеля **волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции.**

?

1. Какие волны называют когерентными?
2. Что называют интерференцией?
3. Сформулируйте условия максимумов и минимумов интерференционной картины.
4. Означает ли взаимное гашение волн в минимуме интерференционной картины, что происходит превращение энергии волны в другие формы энергии?
5. Как формулируется принцип Гюйгенса?
6. Что называется стоячей волной? Чем она отличается от бегущей?
7. Во сколько раз расстояние между соседними узлами стоячей волны меньше длины волны?
8. При каком условии дифракция волн проявляется особенно отчетливо?

УПРАЖНЕНИЕ 4

1. Эхо, вызванное ружейным выстрелом, дошло до стрелка через 4 с после выстрела. На каком расстоянии s от наблюдателя находится преграда, от которой произошло отражение звука? Скорость звука в воздухе принять равной 330 м/с.
2. На расстоянии $s=1060$ м от наблюдателя ударяют молотком по железнодорожному рельсу. Наблюдатель, приложив ухо к рельсу, услышал звук на $\tau=3$ с раньше, чем он дошел до него по воздуху. Чему равна скорость v_1 звука в стали? Скорость звука в воздухе $v=330$ м/с.
3. Определить скорость звука в воде, если колебания с периодом $T=0{,}005$ с порождают звуковую волну длиной $\lambda=7{,}175$ м.
4. Найти разность фаз между двумя точками звуковой волны, если разность их расстояний от источников составляет 25 см, а частота колебаний $\nu=680$ Гц. Скорость звука v принять равной 340 м/с.
5. Расстояние l между узлами стоячей волны, создаваемой камертоном в воздухе, равно 40 см. Определить частоту колебаний ν камертона. Скорость звука v принять равной 340 м/с.
6. Во сколько раз изменится длина звуковой волны при переходе звука из воздуха в воду? Скорость звука в воде 1435 м/с, в воздухе 340 м/с.

Глава V

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

§ 50. СВЯЗЬ МЕЖДУ ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ И ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

При изучении электрических колебаний мы пользовались законами электродинамики, о которых было рассказано в курсе физики IX класса. С электромагнитными волнами дело обстоит иначе. Их существование возможно только потому, что электромагнитное поле обладает еще одним, открытым Максвеллом, важным свойством, о котором пока не было рассказано.

Мы уже знаем, что в явлении электромагнитной индукции Максвелл увидел порождение вихревого электрического поля переменным магнитным полем. При изменении со временем магнитной индукции $\vec{B}$ возникает электрическое поле, линии напряженности которого охватывают линии магнитной индукции (рис. 99, *а*). Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряженность электрического поля.

В соответствии с правилом Ленца при возрастании магнитной индукции $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0\right)$ направление напряженности $\vec{E}$ электрического поля образует левый винт с направлением вектора $\vec{B}$. Это означает, что при вращении винта с левой нарезкой в направлении силовых линий электрического поля поступательное перемещение винта совпадает с направлением магнитной индукции.

Далее Максвелл сделал следующий и последний шаг в открытии основных свойств электромагнитного поля. Он поставил вопрос: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то не существует ли в природе обратного процесса, когда переменное электрическое поле в свою очередь порождает магнитное? Это соображение, диктуемое уверенностью в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии законов природы, составляет основу гипотезы Максвелла.

Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе: во всех случаях, **когда электрическое поле изменяется со временем, оно порождает магнитное поле.** Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряженности электрического поля (рис. 99, *б*). В отличие от явления электромагнитной индукции при возрастании напряженности электрического поля $\left(\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0\right)$ направление магнитной индукции $\vec{B}$ образует правый винт с направлением вектора $\vec{E}$.

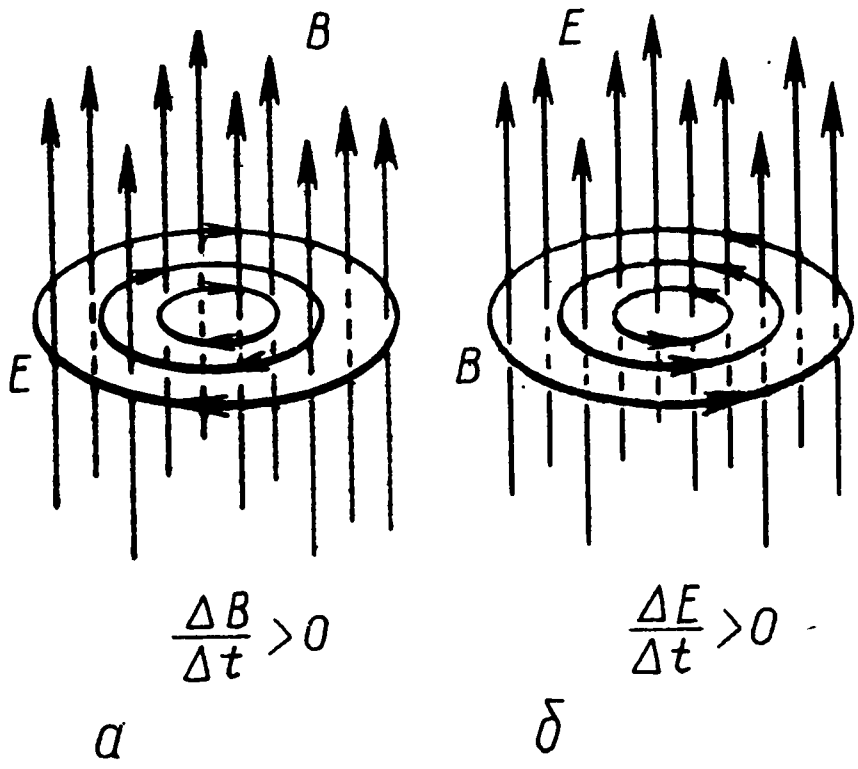


Рис. 99

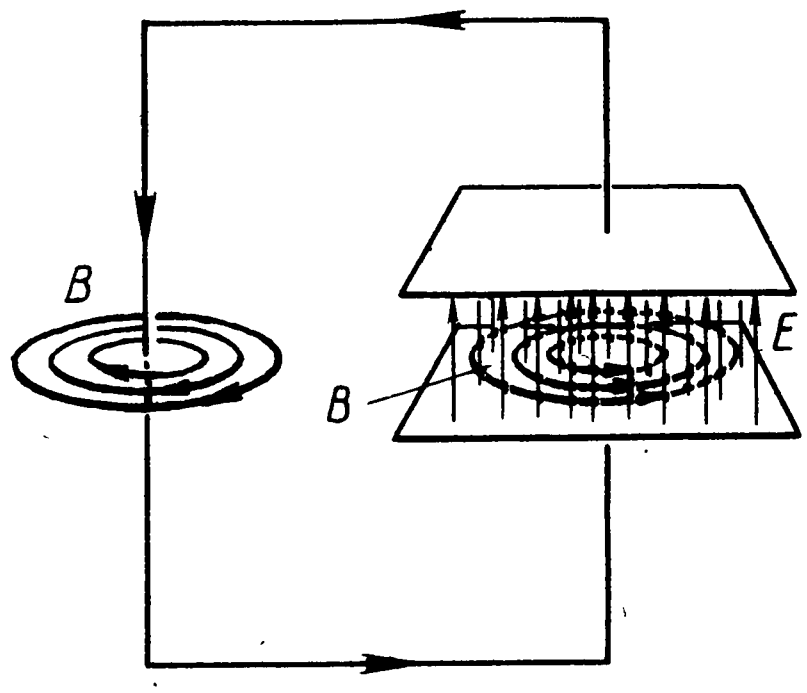


Рис. 100

Согласно гипотезе Максвелла магнитное поле, например, при зарядке конденсатора создается не только током в проводнике, но порождается и изменяющимся электрическим полем в пространстве между обкладками конденсатора (рис. 100). Причем изменяющееся электрическое поле создает такое же магнитное поле, как если бы между обкладками существовал электрический ток, равный току в проводнике. Справедливость гипотезы Максвелла была доказана экспериментальным обнаружением электромагнитных волн. Электромагнитные волны существуют только потому, что переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, которое в свою очередь порождает магнитное поле.

§ 51. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

После открытия взаимосвязи между электрическим и магнитным полями стало ясно, что эти поля не существуют обособленно, независимо одно от другого.

Нельзя создавать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло и переменное электрическое поле. И наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного.

Не менее важно, что электрическое поле без магнитного или магнитное без электрического могут существовать лишь по отношению к определенной системе отсчета. Так, покоящийся заряд создает только электрическое поле (рис. 101). Но ведь заряд покоится лишь относительно определенной системы отсчета. Относительно других систем отсчета он будет двигаться и, следовательно, создавать и магнитное поле (рис. 102).

Точно так же лежащий на земле магнит создает лишь магнитное поле, но движущийся относительно него наблюдатель обнаружит и электрическое поле (в полном соответствии с явлением электромагнитной индукции).

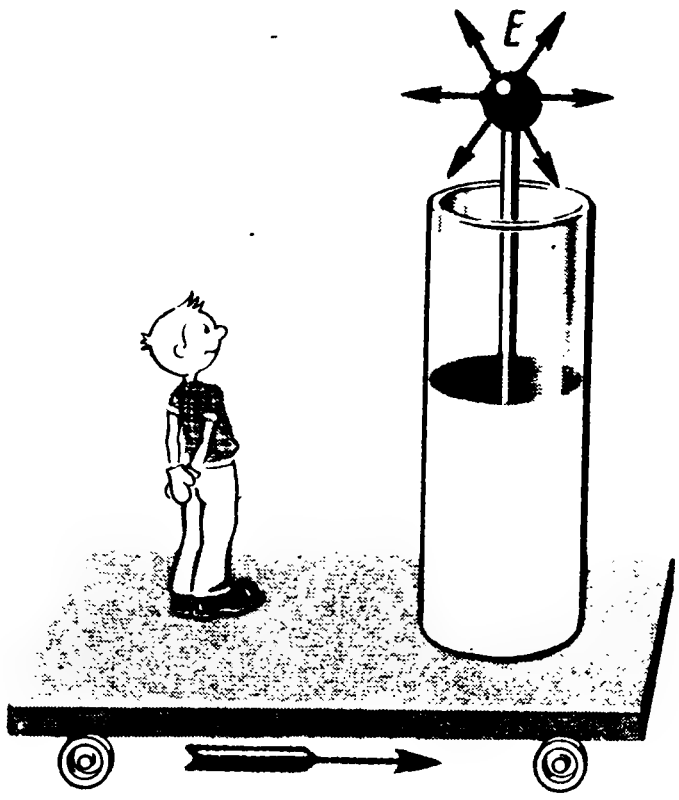


Рис. 101

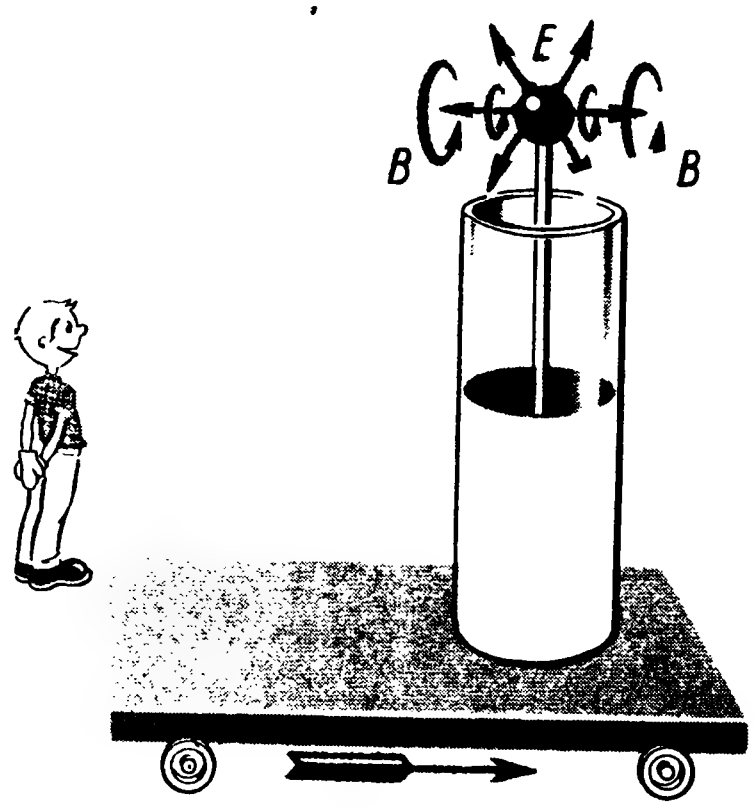


Рис. 102

Значит, **утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, бессмысленно, если не указать, по отношению к какой системе отсчета эти поля рассматриваются.** Отсутствие электрического поля в системе отсчета, содержащей покоящийся магнит, совсем не означает, что электрического поля нет вообще. По отношению к любой движущейся относительно магнита системе отсчета это поле может быть обнаружено.

Электрические и магнитные поля являются проявлениями единого целого, которое может быть названо *электромагнитным полем.* Электромагнитное поле — особая форма материи. Оно существует реально, т. е. независимо от нас, от наших знаний о нем.

В зависимости от того, в какой системе отсчета рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны единого целого — электромагнитного поля. Все инерциальные системы отсчета равноправны. Поэтому ни одна из конфигураций электромагнитного поля не имеет преимуществ по сравнению со всеми остальными.

§ 52. КАК ПЕРЕДАЮТСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Фундаментальные законы природы, к числу которых относятся найденные Максвеллом законы электромагнетизма, замечательны в следующем отношении: они могут дать г о р а з д о б о л ь ш е, чем заключено в тех фактах, на основе которых они получены. Если бы каждый закон содержал в себе лишь те факты, из которых он выведен, то законов было бы столько же, сколько явлений природы. Вместо современной науки мы имели бы необозримое скопление сведений о наблюдаемых в природе процессах, но ничего не смогли бы предсказать.

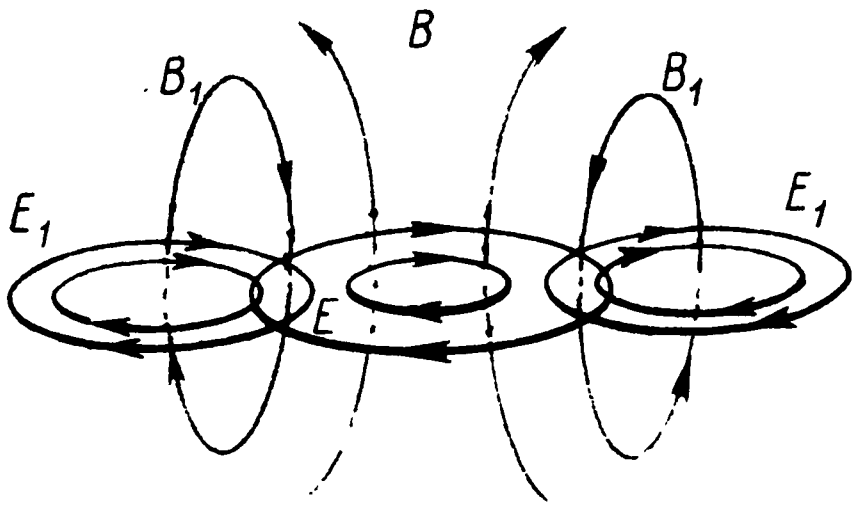


Рис. 103

Среди бесчисленных, очень интересных и важных следствий, вытекающих из максвелловских законов электромагнитного поля, одно заслуживает особого внимания. Это вывод о том, что **электромагнитное взаимодействие распространяется с конечной скоростью.**

Согласно теории дальнодействия кулоновская сила, действующая на электрический заряд, сразу же изменится, если соседний заряд сдвинуть с места. Действие передается мгновенно. С точки зрения действия на расстоянии иначе быть не может. Ведь один заряд непосредственно через пустоту «чувствует» присутствие другого.

По Максвеллу же, дело обстоит совершенно иначе и много сложнее. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное же магнитное поле в свою очередь порождает переменное электрическое поле и т. д.

Схематически этот процесс изображен на рисунке 103. Переменное магнитное поле с линиями индукции B порождает вихри электрического поля с линиями напряженности E. Это электрическое поле создает магнитное поле с линиями индукции B_1 и т. д.

Существенно, что возникающие вихри магнитного или электрического поля гасят поля в тех областях пространства, где они уже имелись, но захватывают новые области пространства. Векторы индукции магнитного поля $\vec{B}$ и $\vec{B}_1$ в одной и той же области пространства направлены в противоположные стороны. То же относится и к векторам $\vec{E}$ и $\vec{E}_1$.

Все происходит по тем правилам определения направления полей, о которых говорилось в § 50. Если бы направления вихревых полей E и B, создаваемых переменными магнитными и электрическими полями, определялись одним и тем же правилом, то закон сохранения энергии был бы нарушен. Созданное в определенном месте пространства магнитное поле нарастало бы со временем, распространяясь одновременно во все стороны.

Перемещение заряда вызывает, таким образом, «всплеск» электромагнитного поля, который, распространяясь, охватывает все большие и большие области окружающего пространства, перестраивая по дороге то поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, этот «всплеск» достигает второго заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы. Но произойдет это не в тот момент времени, когда произошло смещение первого заряда. Процесс распространения электромагнитного возмущения, механизм которого был вскрыт Максвеллом, протекает с конечной, хотя и очень большой, скоростью.

Максвелл чисто математически показал, что скорость распространения этого процесса равна скорости света в пустоте. Вот новое фундаментальное свойство поля, которое делает его осязаемой реальностью.

§ 53. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ВОЛНА

Представьте себе, что электрический заряд не просто сместился из одной точки в другую, а приведен в быстрые колебания вдоль некоторой прямой, так что он движется подобно грузу, подвешенному на пружине, но только много быстрее. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнет периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а последнее в свою очередь вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая все большие и большие области, возникает система периодически изменяющихся электрических и магнитных полей, перпендикулярных друг другу. На рисунке 104 изображен «моментальный снимок» такой системы полей. Образуется так называемая *электромагнитная волна,* бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда. В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут ее колебания полей. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания происходят с различными фазами.

Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т. е. что они движутся с ускорением. **Наличие ускорения — главное условие излучения электромагнитных волн.** Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом быстром изменении его скорости, причем интенсивность излученной волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения волны. **Электромагнитная волна является поперечной.** Если вращать буравчик с правой нарезкой от вектора $\vec{E}$ к вектору $\vec{B}$, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с вектором скорости волны $\vec{c}$.

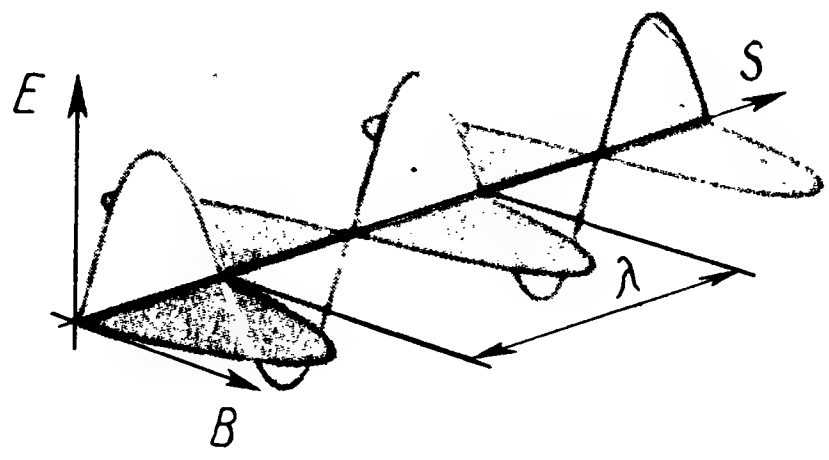


Рис. 104

Максвелл был глубоко убежден в реальности электромагнитных волн. Но он не дожил до их экспериментального обнаружения Лишь через 10 лет после его смерти электромагнитные волны были экспериментально получены Герцем.

§ 54. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Электромагнитная волна образуется благодаря взаимной связи переменных электрических и магнитных полей: изменение одного поля приводит к появлению другого. В § 50 говорилось, что, чем быстрее меняется со временем магнитная индукция, тем больше напряженность возникающего электрического поля. И в свою очередь, чем быстрее меняется напряженность электрического поля, тем больше магнитная индукция.

Следовательно, **для образования интенсивных электромагнитных волн необходимо создать электромагнитные колебания достаточно высокой частоты.**

При этом условии напряженность электрического поля $\vec{E}$ и индукция магнитного поля $\vec{B}$ будут меняться быстро.

Колебания высокой частоты, значительно превышающей частоту промышленного тока (50 Гц), можно получить с помощью колебательного контура. Частота колебаний $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ будет тем больше, чем меньше индуктивность и емкость контура.

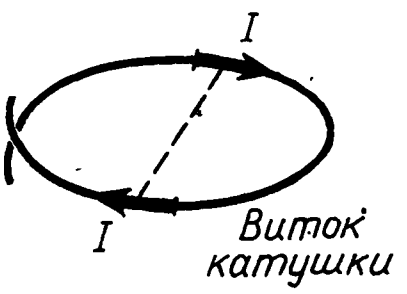


Рис. 105

Однако большая частота электромагнитных колебаний еще не гарантирует интенсивного излучения электромагнитных волн. Обычный контур, какой изображен на рисунке 27 (его можно назвать закрытым), представляет собой почти замкнутую электрическую цепь, в которой сила тока в данный момент времени одинакова во всех участках цепи. Такой контур очень слабо излучает электромагнитные волны.

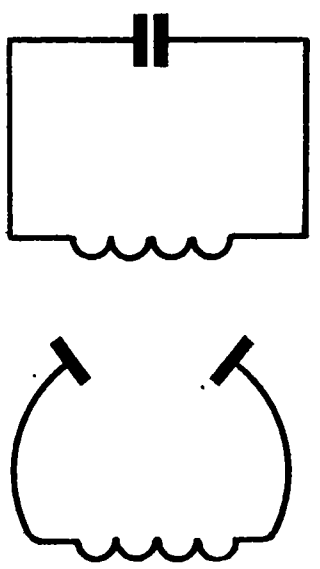


Рис. 106

Каждому участку витка катушки контура соответствует близко расположенный участок на противоположном конце диаметра витка, по которому ток течет в противоположном направлении (рис. 105). На большом расстоянии от витка эти участки создают магнитные поля, индукции которых почти равны по модулям и направлены в противоположные стороны. В результате вдали от контура поля ослабляют друг друга, так что магнитное поле оказывается сосредоточенным лишь внутри катушки.

Так же обстоит дело с электрическими полями зарядов на обкладках конденсатора. Заряды равны по модулям и противоположны по знаку. Почти все электрическое поле сосредоточено между пластинами, а вдали от них поля зарядов противоположных знаков почти целиком компенсируют друг друга.

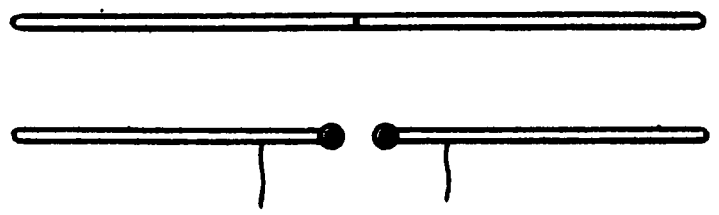


Рис. 107

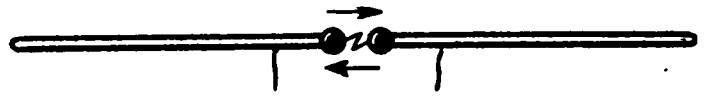


Рис. 108

Для получения электромагнитных волн Герц использовал простое устройство, называемое сейчас *вибратором Герца.* Это устройство представляет собой *открытый колебательный контур.*

К открытому контуру можно перейти от закрытого, если постепенно раздвигать пластины конденсатора, уменьшая их площадь, и одновременно уменьшать число витков в катушке. В конце концов получится просто прямой провод (рис. 106). Это и есть открытый колебательный контур. Емкость и индуктивность вибратора Герца малы. Поэтому частота колебаний весьма велика.

В открытом контуре заряды не сосредоточены на концах, а распределены по всему проводнику. Ток в данный момент времени во всех сечениях проводника направлен в одну и ту же сторону, но сила тока не одинакова в различных сечениях проводника. На концах она равна нулю, а посередине достигает максимума. (Напомним, что в обычных цепях переменного тока сила тока во всех сечениях в данный момент времени одинакова.)

Для возбуждения колебаний в таком контуре во времена Герца поступали так. Провод разрезали посередине так, чтобы остался небольшой воздушный промежуток, называемый искровым (рис. 107). Обе части проводника заряжали до высокой разности потенциалов. Когда разность потенциалов превышала некоторое предельное значение, проскакивала искра, цепь замыкалась, и в открытом контуре возникали колебания (рис. 108).

Создаваемые отдельными участками вибратора электрические и магнитные поля не компенсируют друг друга на больших расстояниях от вибратора.

Колебания в контуре будут затухающими по двум причинам: во-первых, вследствие наличия у контура активного сопротивления; во-вторых, из-за того, что вибратор излучает электромагнитные волны и теряет при этом энергию. После того как колебания прекратятся, оба проводника вновь заряжаются от источника до наступления пробоя искрового промежутка, и все повторяется сначала.

В настоящее время для получения незатухающих колебаний в открытом колебательном контуре его связывают индуктивно с колебательным контуром лампового генератора.

Электромагнитная энергия, излучаемая вибратором в единицу времени, очень сильно зависит от частоты колебаний электри-

Генрих Герц (1857—1894) — выдающийся немецкий физик, впервые экспериментально доказавший в 1886 г. существование электромагнитных волн. Исследуя электромагнитные волны, Герц установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн. Работы Герца послужили экспериментальным доказательством справедливости теории электромагнитного поля и, в частности, электромагнитной теории света.

В 1886 г. Герц впервые наблюдал фотоэффект. В книге «Принципы механики» (1894 г.) Герц дал новую формулировку законов классической механики, в которой не использовалось понятие силы.

ческого тока. Эту зависимость можно установить из следующих соображений. Энергия электромагнитной волны пропорциональна сумме квадратов напряженности E электрического поля и магнитной индукции B (см. учебник физики IX класса). Амплитуда же колебаний как электрического, так и магнитного полей электромагнитной волны пропорциональна ускорению излучающих электромагнитные волны заряженных частиц, а ускорение частиц при колебательном движении пропорционально квадрату частоты (см. § 9). Следовательно, **энергия, излучаемая в единицу времени, пропорциональна четвертой степени частоты.**

При увеличении частоты колебаний всего лишь в два раза излучаемая энергия возрастает в 16 раз! В антеннах радиостанций возбуждаются колебания с частотами от десятков тысяч до десятков миллионов герц. Излучение же промышленных переменных токов с частотой 50 Гц практически остается незамеченным.

§ 55. ОПЫТЫ ГЕРЦА. СКОРОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Герц получил электромагнитные волны, возбуждая в вибраторе с помощью источника высокого напряжения серию импульсов быстропеременного тока. Колебания электрических зарядов в вибраторе создают электромагнитную волну. Только колебания в вибраторе совершает не одна заряженная частица, а огромное число электронов, движущихся согласованно. В электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу, причем вектор $\vec{E}$ лежит в плоскости, проходящей через вибратор, а вектор $\vec{B}$ перпендикулярен этой плоскости. На рисунке 109 показаны линии электрического и магнитного полей вокруг вибратора в фиксированный момент времени: в горизонтальной плоскости расположены линии магнитного поля, а в вертикальной — линии электрического поля. Излучение волн происходит с максимальной интенсивностью в направлении, перпендикулярном оси вибратора. Вдоль оси излучения не происходит.

Регистрировались электромагнитные волны Герцем с помощью приемного вибратора, представляющего собой такое же устройство, как и излучающий вибратор. Под действием переменного электрического поля электромагнитной волны в приемном вибраторе возбуждаются колебания тока. Если собственная частота приемного вибратора совпадает с частотой электромагнитной волны, наблюдается резонанс и колебания в приемном вибраторе происходят с большой амплитудой. Герц обнаруживал их, наблюдая искорки в очень маленьком промежутке между проводниками приемного вибратора.

Герц не только получил электромагнитные волны, но и обнаружил, что они ведут себя подобно другим видам волн. В частности, он наблюдал отражение электромагнитных волн от металлического листа и интерференцию волн. При сложении волны, идущей от вибратора, с волной, отраженной от металлического листа, образуется стоячая волна. Перемещая приемный вибратор, можно найти положение пучностей стоячей волны и определить длину волны. Длина волны равна удвоенному расстоянию между пучностями.

В опытах Герца длина волны составляла несколько десятков сантиметров. Вычислив собственную частоту электромагнитных колебаний вибратора, Герц смог определить скорость электромагнитной волны по формуле $v=\lambda\nu$. Она оказалась равной скорости света $c=300\,000$ км/с.

Опыты Герца блестяще подтвердили теоретические предсказания Максвелла.

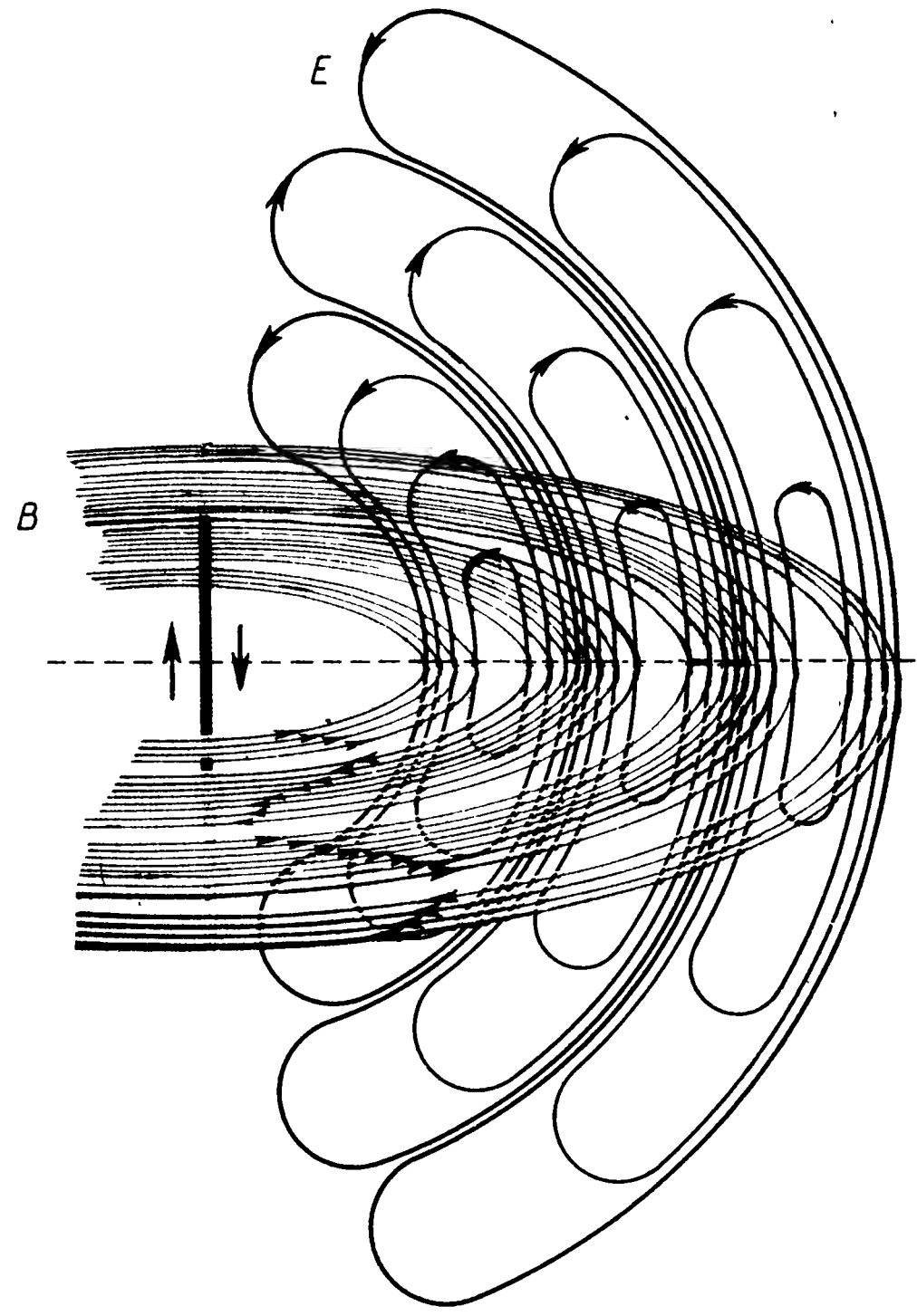


Рис. 109

?

1. В результате каких процессов возникает магнитное поле?
2. Почему утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, не является вполне определенным?
3. Как ориентированы векторы $\vec{E}$, $\vec{B}$ и $\vec{c}$ друг по отношению к другу в электромагнитной волне?
4. Как должна двигаться частица, чтобы она излучала электромагнитные волны?
5. Как зависит энергия, излучаемая вибратором в единицу времени, от частоты колебаний?

Александр Степанович Попов (1859—1906) — знаменитый русский физик, изобретатель радио. Убежденный в возможности связи без проводов при помощи электромагнитных волн, Попов построил первый в мире радиоприемник, применив в его схеме чувствительный элемент — *когерер*. Во время опытов по радиосвязи с помощью приборов Попова было впервые обнаружено отражение радиоволн от кораблей.

§ 56. ИЗОБРЕТЕНИЕ РАДИО А. С. ПОПОВЫМ

Опыты Герца, описание которых появилось в 1888 г., заинтересовали физиков всего мира. Многие ученые стали искать пути усовершенствования излучателя и приемника электромагнитных волн.

В России одним из первых занялся изучением электромагнитных волн преподаватель офицерских минных курсов в Кронштадте Александр Степанович Попов. Начав с воспроизведения опытов Герца, он затем нашел более надежный и чувствительный способ регистрации электромагнитных волн.

В качестве детали, непосредственно «чувствующей» электромагнитные волны, А. С. Попов применил *когéрер*. Этот прибор представляет собой стеклянную трубку с двумя электродами. В трубке помещены мелкие металлические опилки. Действие прибора основано на влиянии электрических разрядов на металлические порошки. В обычных условиях когерер обладает большим сопротивлением, так как опилки имеют плохой контакт друг с другом. Пришедшая электромагнитная волна создает в когерере переменный ток высокой частоты. Между опилками проскакивают мельчайшие искорки, которые сваривают опилки. В результате сопротивление когерера резко падает (в опытах А. С. Попова — с 100 000 Ом до 1000—500 Ом, т. е. в 100—200 раз). Снова вернуть прибору большое сопротивление можно, встряхнув его. Чтобы обеспечить автоматичность приема, необходимую для осуществления беспроволочной связи, А. С. Попов использовал звонковое устройство для встряхивания когерера после приема сигнала. Цепь электрического звонка замыкалась через когерер в момент прихода электромагнитной волны. С окончанием приема волны работа звонка сразу прекращалась, так как молоточек звонка ударял не только по звонковой чашке, но и по когереру. Аппарат был готов к приему новой волны.

Чтобы повысить чувствительность аппарата, А. С. Попов один из выводов когерера заземлил, а другой присоединил к высоко

поднятому куску проволоки, создав первую *приемную антенну.* Заземление превращает проводящую поверхность земли в часть открытого колебательного контура, что увеличивает дальность приема. Упрощенная схема приемника А. С. Попова приведена на рисунке 110.

Хотя современные радиоприемники очень мало напоминают приемник А. С. Попова, основные принципы их действия те же, что и в его приборе. Современный приемник также имеет антенну, в которой приходящая волна вызывает очень слабые электрические колебания. Как и в приемнике Попова, энергия этих колебаний не используется непосредственно для приема. Слабые сигналы лишь управляют источниками энергии, питающими последующие цепи. Сейчас такое управление осуществляется с помощью электронных ламп и полупроводниковых приборов.

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал действие своего прибора, явившегося по сути дела первым в мире радиоприемником. День 7 мая стал днем рождения радио. Ныне он ежегодно отмечается в нашей стране.

А. С. Попов продолжал настойчиво совершенствовать приемную и передающую аппаратуру. Он ставил своей непосредственной задачей построить прибор для передачи сигналов на большие расстояния. В декабре 1897 г. ученый продемонстрировал на заседании Русского физико-химического общества передачу и прием первой в мире радиограммы.

Вначале радиосвязь была установлена на расстоянии всего 250 м. Неустанно работая над своим изобретением, Попов вскоре добился дальности связи более 600 м. Затем на маневрах Черноморского флота в 1899 г. ученый установил радиосвязь на расстоянии свыше 20 км, а в 1901 г. дальность радиосвязи была уже 150 км. Важную роль в этом сыграла новая конструкция передатчика. Искровой промежуток был размещен в колебательном контуре, индуктивно связанном с передающей антенной и настроенном с ней в резонанс. Существенно изменились и способы регистрации сигнала. Параллельно звонку был включен телеграфный аппарат, позволивший вести автоматическую запись сигналов. В 1899 г. была обнаружена возможность приема сигналов с помощью телефона. В начале 1900 г. радиосвязь была успешно использована во время спасательных работ в Финском заливе.

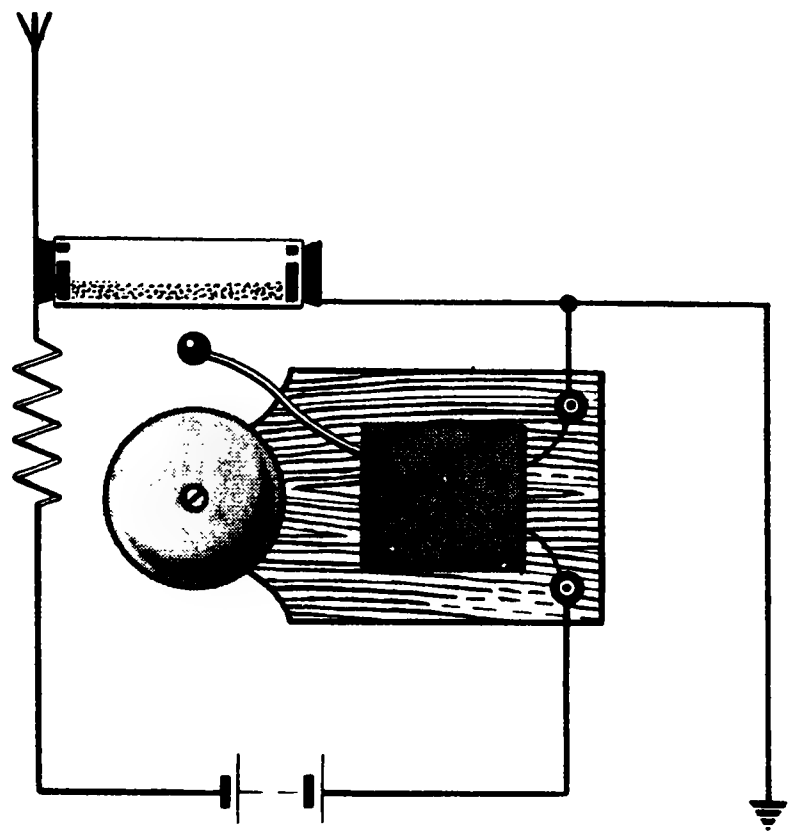


Рис. 110

За границей впоследствии усовершенствование подобных приборов проводилось фирмой, организованной итальянским инженером Г. Маркони. Опыты, поставленные в широком масштабе, позволили осуществить радиотелеграфную передачу через Атлантический океан.

§ 57. ПРИНЦИПЫ РАДИОСВЯЗИ

Принцип радиосвязи заключается в следующем. Переменный электрический ток высокой частоты, созданный в передающей антенне, вызывает в окружающем пространстве быстро меняющееся электромагнитное поле, которое распространяется в виде электромагнитной волны. Достигая приемной антенны, электромагнитная волна вызывает в ней переменный ток той же частоты, на которой работает передатчик.

Важнейшим этапом в развитии радиосвязи было создание в 1913 г. лампового генератора незатухающих электромагнитных колебаний (см. § 30).

Кроме передачи телеграфных сигналов, состоящих из коротких и более продолжительных импульсов электромагнитных волн (рис. 111), стала возможной надежная и высококачественная *радиотелефонная связь* — передача речи или музыки с помощью электромагнитных волн.

При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются с помощью микрофона в электрические колебания той же формы. Казалось бы, что если эти колебания усилить и подать в антенну, то можно будет передавать на расстояние речь и музыку с помощью электромагнитных волн. Однако в действительности такой способ передачи неосуществим. Дело в том, что колебания звуковой частоты представляют собой сравнительно медленные колебания, а электромагнитные волны низкой (звуковой) частоты почти совсем не излучаются.

Для осуществления радиотелефонной связи необходимо использовать высокочастотные колебания, интенсивно излучаемые антенной. Незатухающие гармонические колебания высокой частоты вырабатывает ламповый генератор. Для передачи звука эти колебания изменяют, или, как говорят, *модулируют,* с помощью электрических колебаний низкой (звуковой) частоты. Можно, например, изменять со звуковой частотой амплитуду высокочастотных колебаний. Этот способ называют *амплитудной модуляцией.* На рисунке 112 показаны графики колебаний высокой частоты — ее называют *несущей частотой (а),* колебаний звуковой частоты (*б*) и модулированных по амплитуде колебаний (*в*).

В приемнике из модулированных колебаний высокой частоты выделяются низкочастотные колебания. Такой процесс преобразования сигнала называют *демодуляцией* или *детектированием.*

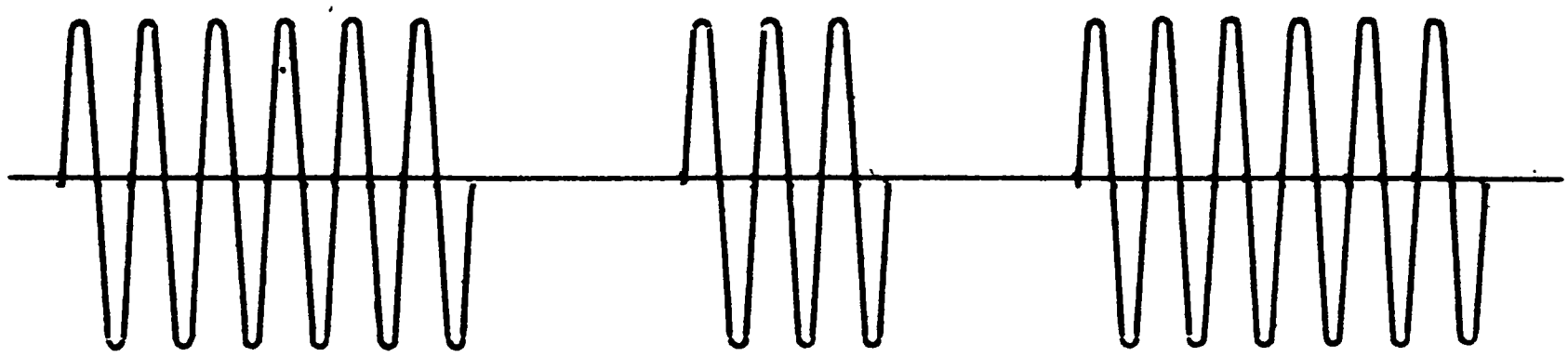


Рис. 111

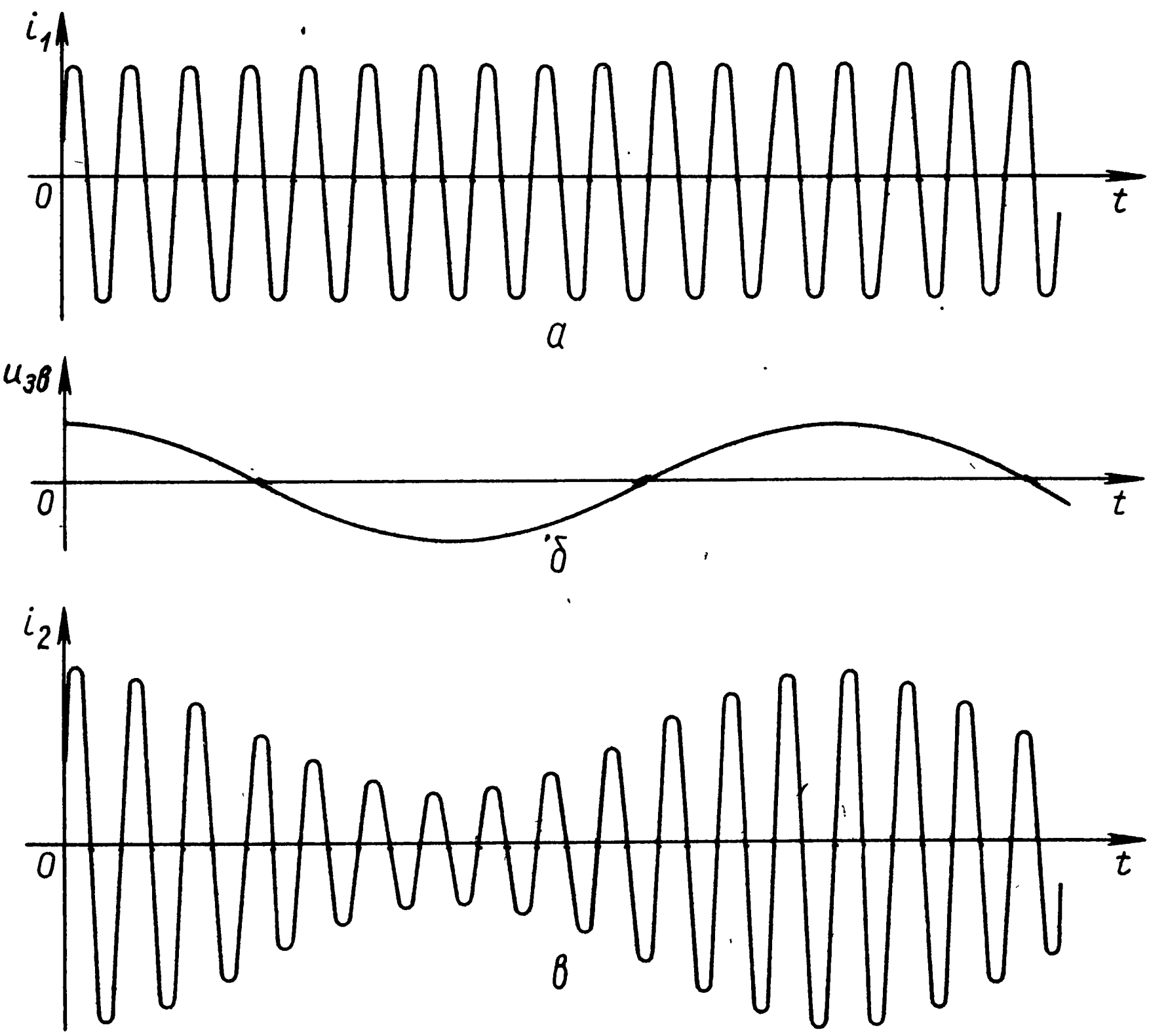


Рис. 112

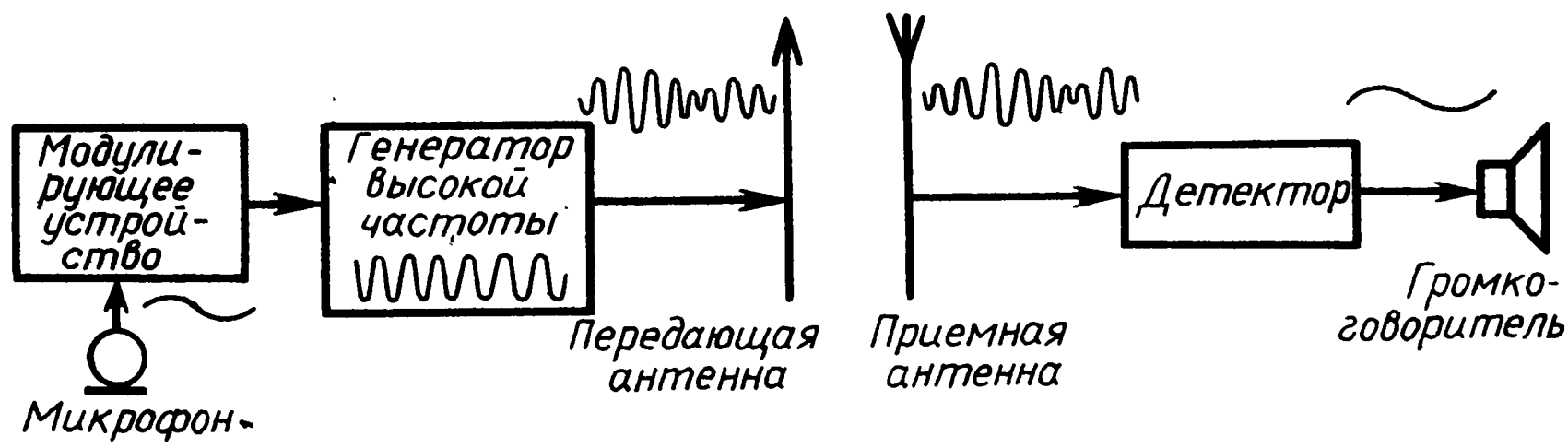


Рис. 113

Полученный в результате детектирования сигнал соответствует тому звуковому сигналу, который действовал на микрофон передатчика. После усиления электрические колебания низкой частоты превращают в звук или используют для других целей.

Блок-схема радиовещательного тракта показана на рисунке 113.

§ 58. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ

Амплитуду вырабатываемых ламповым генератором высокочастотных колебаний можно модулировать посредством изменения разности потенциалов между электродами лампы генератора, например между анодом и катодом. Чем больше напряжение между анодом и катодом триода, тем больше сила тока в анодной цепи и соответственно большая энергия поступает за период от источника в колебательный контур генератора. Это приводит к увеличению амплитуды электрических колебаний в контуре. При уменьшении анодного напряжения энергия, поступающая за период в контур, также уменьшается, и поэтому уменьшается амплитуда колебаний в контуре.

Если менять анодное напряжение с частотой, много меньшей частоты колебаний, вырабатываемых генератором, то изменения амплитуды этих колебаний будут приблизительно прямо пропорциональны изменениям напряжения между анодом и катодом.

Для осуществления амплитудной модуляции включают последовательно с источником постоянного анодного напряжения дополнительный источник переменного напряжения низкой частоты. Этим источником может являться, например, вторичная обмотка трансформатора, если по его первичной обмотке протекает ток звуковой частоты (рис. 114). В результате амплитуда колебаний в колебательном контуре генератора будет изменяться в такт с изменениями анодного напряжения. Это и означает, что высокочастотные колебания модулируются по амплитуде низкочастотным сигналом.

Временну́ю развертку модулированных колебаний можно непосредственно наблюдать на экране осциллографа, если подать на него напряжение с колебательного контура.

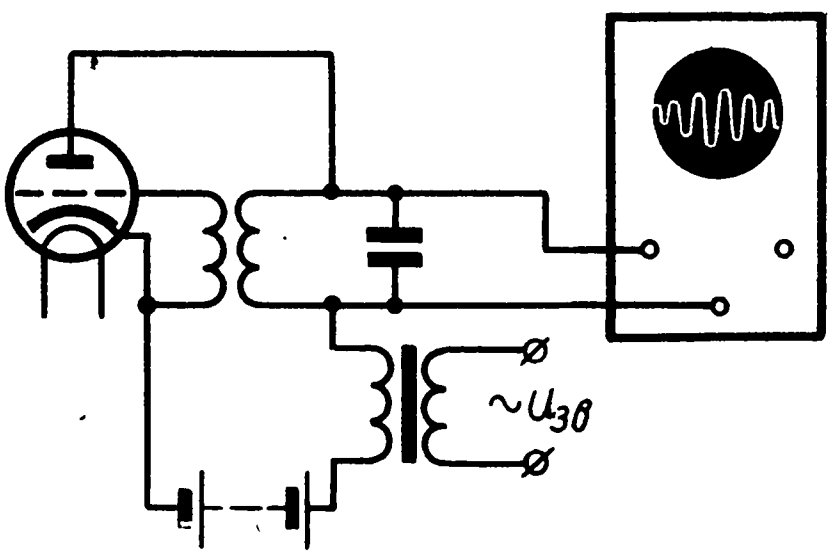


Рис. 114

Кроме амплитудной модуляции, в некоторых случаях применяют частотную модуляцию — изменение частоты колебания в соответствии с управляющим сигналом. Ее преимуществом является большая устойчивость по отношению к помехам.

§ 59. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Принятый приемником модулированный высокочастотный сигнал даже после усиления не способен непосредственно вызвать колебания мембраны телефона или рупора громкоговорителя со звуковой частотой. Он может вызвать только высокочастотные колебания, не воспринимаемые нашим ухом. Поэтому в приемнике необходимо сначала из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты.

Детектирование осуществляется устройством, содержащим элемент с односторонней проводимостью — детектор. Таким элементом может быть электронная лампа (вакуумный диод, триод) или полупроводниковый диод.

Рассмотрим работу полупроводникового детектора. Пусть этот прибор включен в цепь последовательно с источником модулированных колебаний и нагрузкой (рис. 115). Ток в цепи будет течь преимущественно в одном направлении, отмеченном на рисунке стрелкой, так как сопротивление диода в прямом направлении много меньше, чем в обратном. Мы вообще можем пренебречь обратным током и считать, что диод обладает односторонней проводимостью. Вольт-амперную характеристику диода приближенно можно представить в виде ломаной, состоящей из двух прямолинейных отрезков (рис. 116).

В цепи, показанной на рисунке 115, будет течь пульсирующий ток, график которого показан на рисунке 117. Этот пульсирующий ток сглаживается (рис. 118, *а*) с помощью фильтра. Простейший фильтр представляет собой конденсатор, присоединенный к нагрузке (рис. 119). Работа фильтра происходит так. В те моменты времени, когда диод пропускает ток, часть его проходит через нагрузку, а другая часть ответвляется в конденсатор, заряжая его (сплошные стрелки на рисунке 119). Разветвление тока уменьшает величину импульсов, проходящих через нагрузку. Зато в промежутке между импульсами, когда диод заперт, конденсатор частично разряжается через нагрузку. Поэтому в интервале между импульсами ток через нагрузку течет в ту же сторону (пунктирная стрелка на рисунке 119). Каждый новый импульс подзаряжает конденсатор.

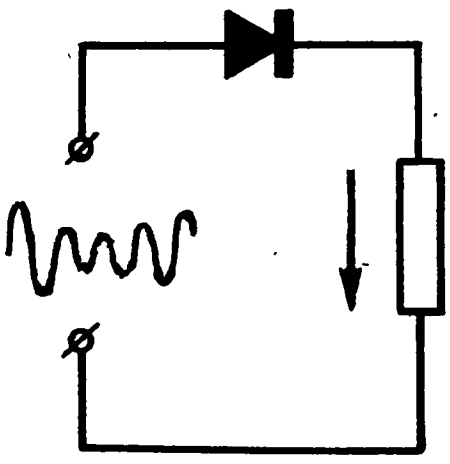


Рис. 115

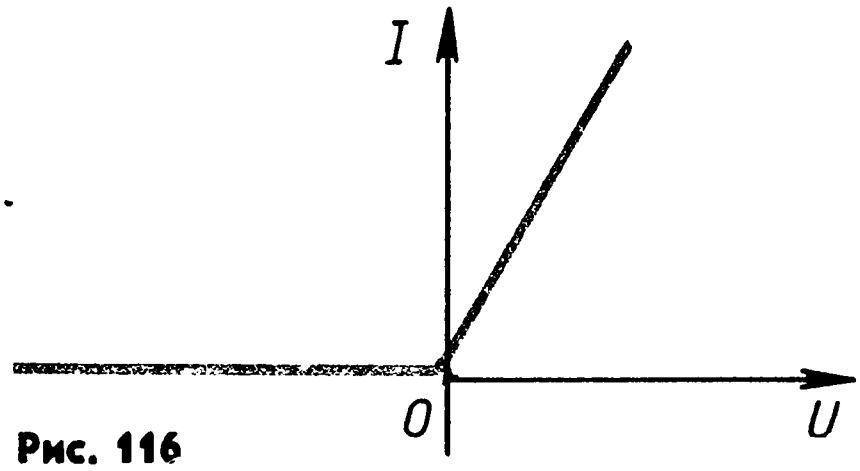


Рис. 116

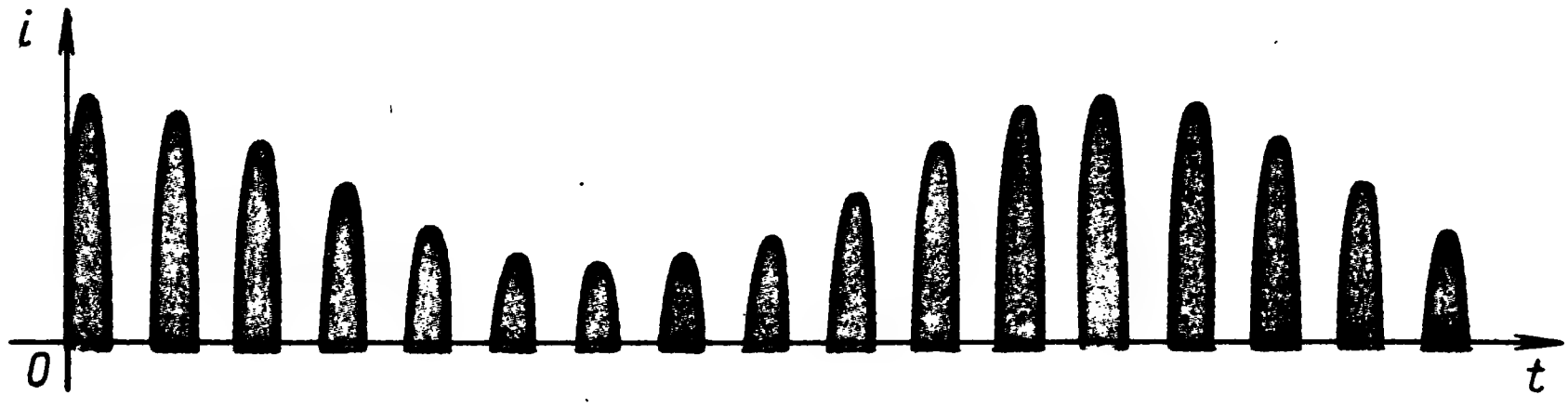
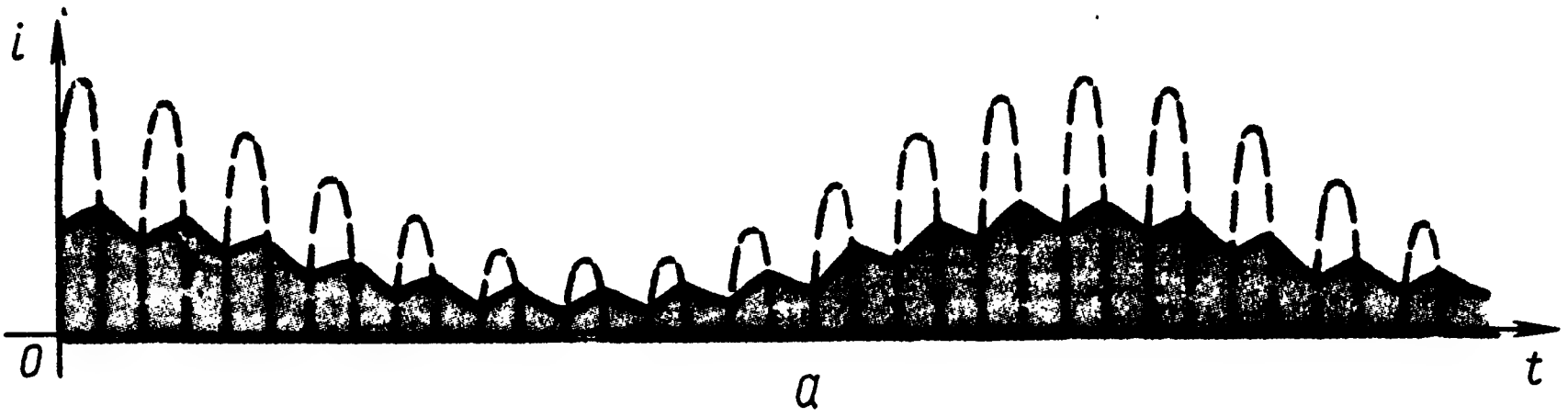


Рис. 117



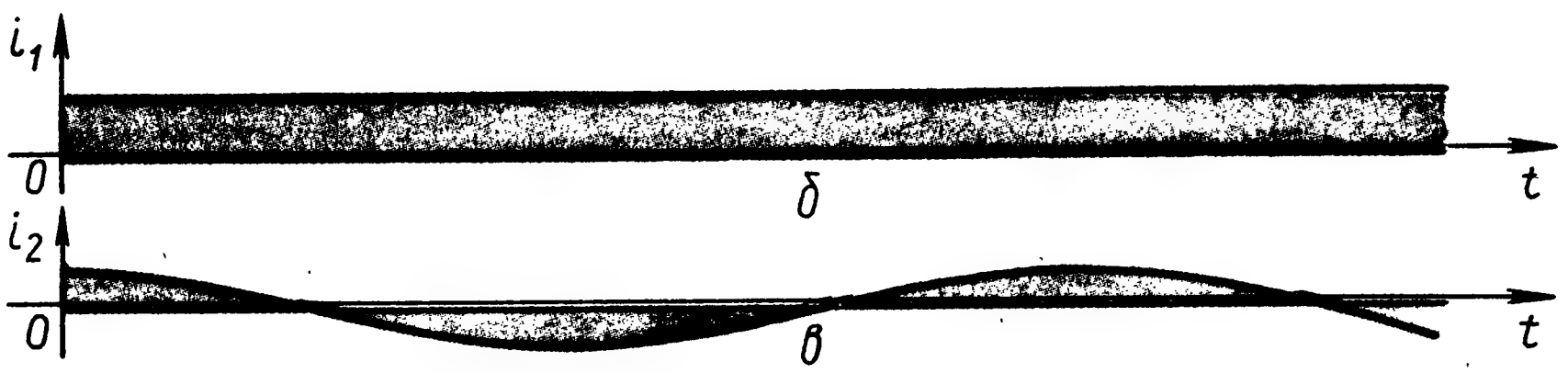


Рис. 118

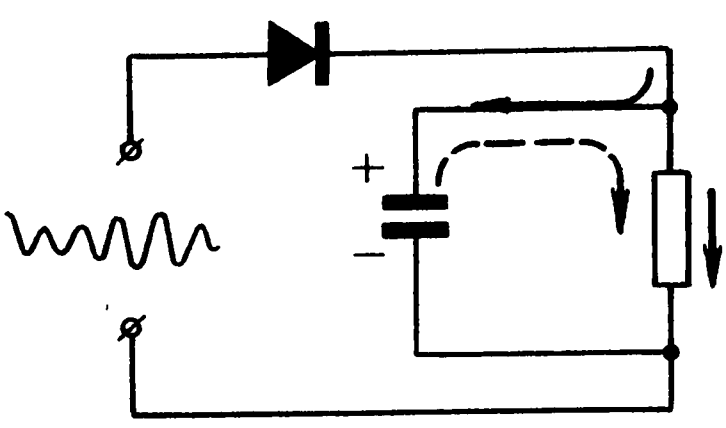


Рис. 119

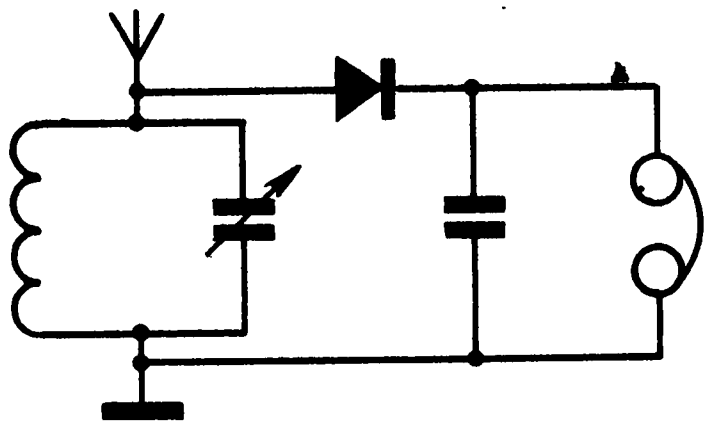


Рис. 120

Благодаря этому через нагрузку течет ток звуковой частоты, форма колебаний которого почти точно воспроизводит форму низкочастотного сигнала на передающей станции (см. рис. 118, *а*). Этот ток можно рассматривать как сумму постоянного тока (рис. 118, *б*) и переменного тока низкой частоты (рис. 118, *в*).

Простейший детекторный приемник состоит из колебательного контура, связанного с антенной, и присоединенной к контуру цепи, состоящей из детектора и телефонов (рис. 120). Катушки телефонов играют роль нагрузки. Через них течет ток звуковой частоты. Небольшие пульсации высокой частоты не сказываются заметно на колебаниях мембраны и не воспринимаются на слух.

§ 60. НАБЛЮДЕНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Современные радиотехнические устройства позволяют провести очень наглядные опыты по обнаружению свойств электромагнитных волн. При этом лучше всего пользоваться волнами сантиметрового диапазона, излучаемыми специальным генератором сверхвысокой частоты (СВЧ). Колебания генератора модулируют звуковой частотой, так чтобы принятый сигнал после детектирования можно было подать на громкоговоритель. Электромагнитные волны сантиметрового диапазона хорошо распространяются внутри проводящей трубы прямоугольного сечения — в *волноводе*. В конце труба расширяется, образуя рупор, излучающий радиоволны в направлении оси трубы. Приемная антенна представляет собой такой же рупор, улавливающий волны, которые распространяются вдоль его оси. Приемный рупор переходит в волновод, оканчивающийся детекторным устройством. Общий вид установки изображен на рисунке 121.

Для обнаружения *поглощения* и *рассеяния* волн располагают рупоры друг против друга и, добившись хорошей слышимости звука в громкоговорителе, помещают между рупорами различные диэлектрические тела. При этом замечают уменьшение громкости.

Если же диэлектрик заменить металлической пластинкой, то волны не достигают приемника вследствие *отражения*. Звук не слышен. Отражение происходит под углом, равным углу падения. Чтобы убедиться в этом, рупоры располагают под одинаковым углом к большому металлическому листу. Звук исчезает, если убрать лист или повернуть его.

Электромагнитные волны изменяют свое направление *(преломляются)* на границе диэлектрика. Это можно обнаружить с помощью большой треугольной призмы из парафина. Рупоры располагают под углом друг к другу, как и при демонстрации отражения. Металлический лист заменяют призмой. Убирая призму или поворачивая ее, наблюдают исчезновение звука.

Электромагнитные волны являются *поперечными* волнами: векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ электромагнитного поля волны перпендикулярны направлению ее распространения. В опытах с генератором СВЧ каждый из векторов расположен в определенной плоскости. Такие электромагнитные волны называются *поляризованными*. Приемный рупор с детектором принимает только поляризованную в определенном направлении волну. Это можно обнаружить, повернув передающий или приемный рупор на 90°. Звук при этом исчезает.

Поляризацию наблюдают, помещая между генератором и приемником решетку из параллельных металлических стержней. Решетку располагают так, чтобы стержни были горизонтальными или вертикальными. В одном из положений электрический вектор параллелен стержням. В них возбуждаются токи, в результате чего решетка отражает волны подобно сплошной металлической пластине. В другом положении вектор $\vec{E}$ перпендикулярен стержням. Токи не возбуждаются, и электромагнитная волна проходит.

На опытах с генератором СВЧ можно также наблюдать такие важнейшие волновые явления, как *интерференция* и *дифракция*.

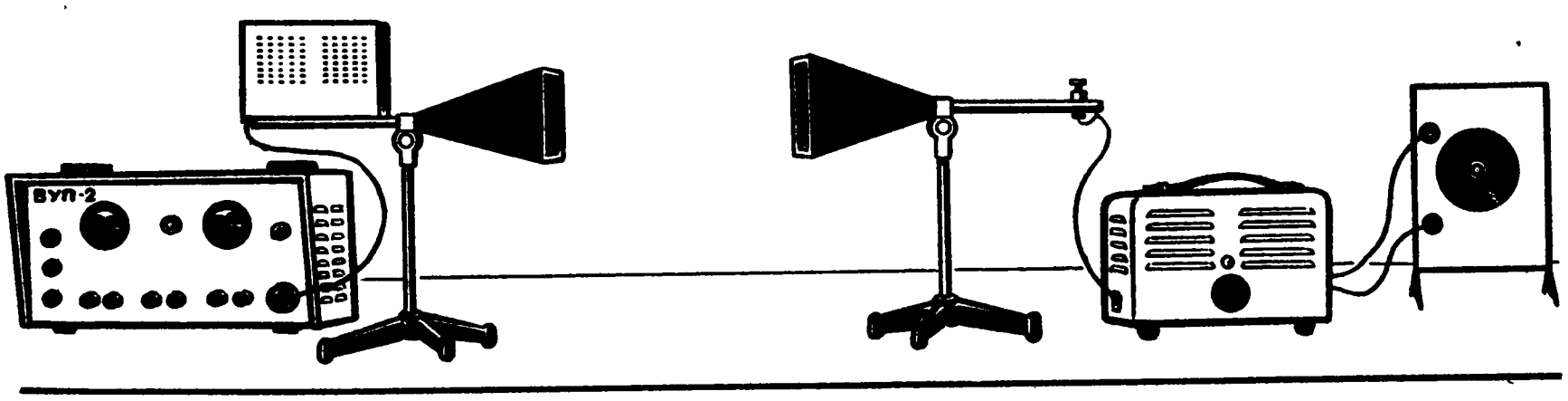


Рис. 121

§ 61. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

При использовании электромагнитных волн для радиосвязи как источник, так и приемник радиоволн чаще всего располагаются вблизи земной поверхности. Ее форма и физические свойства, а также состояние атмосферы сильно влияют на распространение радиоволн.

Особенно существенное влияние на распространение радиоволн оказывают слои ионизированного газа в верхних частях атмосферы на высоте 100—300 км над поверхностью Земли. Эти слои называют *ионосферой*. Ионизация воздуха верхних слоев атмосферы вызывается электромагнитным излучением Солнца и потоком заряженных частиц, испускаемых им.

Проводящая электрический ток ионосфера отражает радиоволны с длиной волны $\lambda > 10—15$ м, как обычная металлическая пластина. Но способность ионосферы отражать и поглощать радиоволны существенно меняется в зависимости от времени суток и времен года [1].

Устойчивая радиосвязь между удаленными пунктами на земной поверхности вне прямой видимости оказывается возможной благодаря отражению волн от ионосферы и способности радиоволн огибать выпуклую земную поверхность (т. е. дифракции). Дифракция выражена тем сильнее, чем больше длина волны. Поэтому радиосвязь на больших расстояниях за счет огибания волнами Земли оказывается возможной лишь при длинах волн, значительно превышающих 100 м *(средние и длинные волны)*.

Короткие волны ($\lambda < 100$ м) распространяются на большие расстояния только за счет многократных отражений от ионосферы и поверхности Земли (рис. 122). Именно с помощью коротких волн ($\lambda = 100—10$ м) можно осуществить радиосвязь на любых расстояниях между радиостанциями на Земле.

Длинные радиоволны для этой цели менее пригодны из-за значительного поглощения поверхностными слоями Земли и ионосферой. Все же наиболее надежная радиосвязь на ограниченных расстояниях при достаточной мощности передающей радиостанции обеспечивается на длинных волнах.

Ультракороткие радиоволны ($\lambda < 10$ м) проникают сквозь ионосферу и почти не огибают поверхность Земли. Поэтому они используются для радиосвязи между пунктами в пределах прямой видимости, а также для связи с космическими кораблями.

Рис. 122

[1] Именно поэтому радиосвязь, особенно в диапазоне средних длин волн ($\lambda = 100—1000$ м), гораздо надежнее ночью и в зимнее время.

§ 62. РАДИОЛОКАЦИЯ

В современной технике явление отражения радиоволн различными препятствиями находит широкое применение. Высокочувствительные приемники улавливают и усиливают отраженный сигнал с целью получить информацию о том, где находится тот предмет, от которого отразилась волна.

Обнаружение и точное определение местонахождения объектов с помощью радиоволн называют радиолокацией. Радиолокационная установка *(радиолокатор)* [1] состоит из передающей и приемной частей. В радиолокации используют электрические колебания сверхвысокой частоты (10^8—10^{11} Гц). Мощный генератор СВЧ связан с антенной, которая излучает остронаправленную волну. В радиолокаторах, работающих на длинах волн порядка 10 см и меньше, такая волна создается антеннами в виде параболических зеркал. Для волн метрового диапазона антенны имеют вид сложных систем вибраторов. При этом острая направленность излучения получается вследствие интерференции волн. Антенна устроена так, что волны, посланные каждым из вибраторов, при сложении взаимно усиливают друг друга лишь в заданном направлении. В остальных направлениях при сложении волн происходит полное или частичное их взаимное гашение.

Отраженная волна улавливается той же излучающей антенной либо другой, тоже остронаправленной приемной антенной. Ярко выраженная направленность излучения позволяет говорить о «луче» радиолокатора. Направление на объект и определяется как направление луча в момент приема отраженного сигнала.

Для определения расстояния до цели применяют импульсный режим излучения. Передатчик излучает волны кратковременными импульсами. Длительность каждого импульса составляет миллионные доли секунды, а промежуток между импульсами примерно в 1000 раз больше. Во время пауз принимаются отраженные волны.

Определение расстояния R производится путем измерения общего времени t прохождения радиоволн до цели и обратно. Так как скорость радиоволн $c=3\cdot10^8$ м/с в атмосфере практически постоянна, то

$$R=\frac{ct}{2}.$$

Вследствие рассеяния радиоволн до приемника доходит лишь ничтожная часть той энергии, которую излучает передатчик. Поэтому приемники радиолокаторов усиливают принятый сигнал в миллионы миллионов (10^{12}) раз. Такой чувствительный приемник, разумеется, должен быть отключен на время посылки импульса передатчиком. Однако мгновенная мощность передатчика во время посылки импульса так велика (десятки, сотни и даже

---

[1] Часто применяется другое название — *радар*.

тысячи киловатт), что влияние передающего устройства полностью не устраняется. Поэтому в момент передачи светлая точка, равномерно движущаяся по экрану электроннолучевой трубки, отклоняется. На экране появляется всплеск около нулевой отметки шкалы дальности (рис. 123). Светящееся пятнышко на экране продолжает равномерно двигаться вдоль шкалы и в момент приема слабого отраженного сигнала снова отклоняется. Расстояние между всплесками на экране пропорционально времени t прохождения сигнала и, следовательно, пропорционально расстоянию R до цели. Это позволяет проградуировать шкалу непосредственно в километрах.

Радиолокационные установки обнаруживают корабли и самолеты на расстояниях до нескольких сот километров. На их работу мало влияют условия погоды и время суток. В больших аэропортах локаторы следят за взлетающими и идущими на посадку самолетами. Наземная служба передает по радио пилотам необходимые указания и таким образом обеспечивает безопасность полетов. Внешний вид аэродромного радиолокатора показан на рисунке 124. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для навигационных целей. Такие локаторы создают на экране картину расположения объектов, рассеивающих радиоволны. Оператор имеет перед глазами радиолокационную карту местности.

В настоящее время применение радиолокации становится все более разнообразным. С помощью локаторов наблюдают метеоры в верхних слоях атмосферы. Локаторы используются службой погоды для наблюдения за облаками. Наконец, локаторы используются в космических исследованиях. Каждый космический корабль обязательно имеет на борту несколько радиолокаторов. В 1946 г. в США и Венгрии был осуществлен эксперимент по приему сигнала, отраженного от поверхности Луны. В 1961 г. советскими учеными произведена радиолокация планеты Венера, что позволило оценить период вращения планеты вокруг своей оси и уточнить некоторые астрономические расстояния. В настоящее время осуществлена локация и других планет солнечной системы.

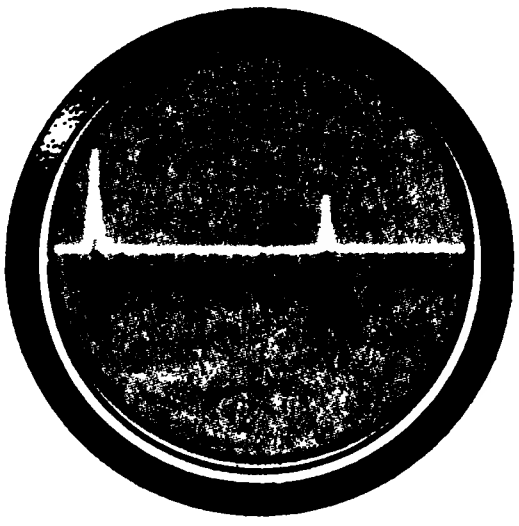


Рис. 123

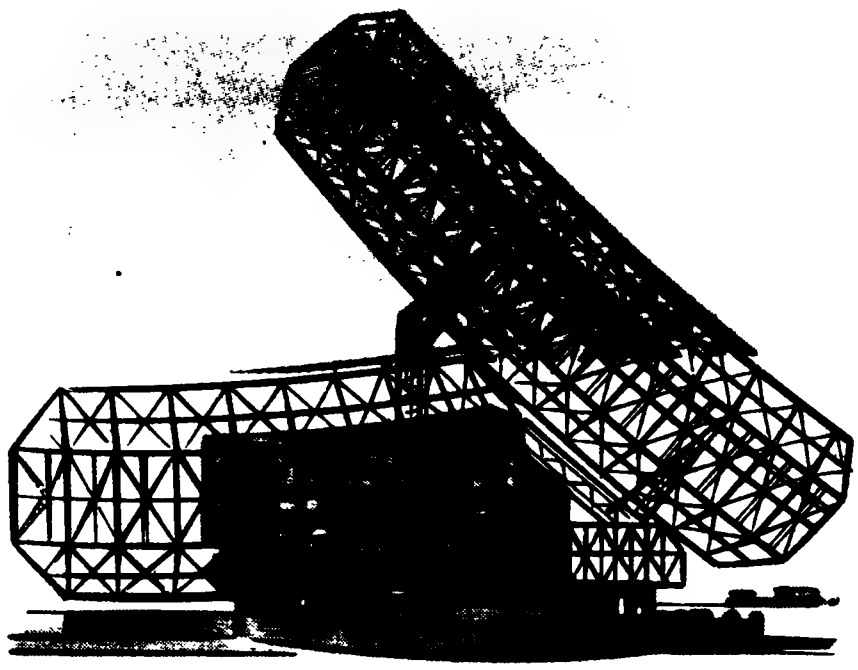


Рис. 124

§ 63. ПОНЯТИЕ О ТЕЛЕВИДЕНИИ

Бурно развивается сравнительно молодая область радиоэлектроники — телевидение.

Принцип передачи изображений на расстояние состоит в следующем. На передающей станции производится преобразование изображения в последовательность электрических сигналов. Эти сигналы модулируют затем колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты. Модулированная электромагнитная волна переносит информацию на большие расстояния. В приемнике производится обратное преобразование. Высокочастотные модулированные колебания детектируются, а полученный сигнал преобразуется в видимое изображение. Для передачи движения используют принцип кино: немного отличающиеся друг от друга изображения движущегося объекта (кадры) передают десятки раз в секунду.

Преобразование изображения кадра в серию электрических сигналов производится с помощью передающей вакуумной электронной трубки — *иконоскопа* (рис. 125). Внутри иконоскопа расположен мозаичный экран, на который проецируется изображение объекта с помощью оптической системы. Каждая ячейка мозаики заряжена, и ее заряд зависит от падающей на ячейку световой энергии. Этот заряд меняется при попадании на ячейку электронного пучка, создаваемого электронной пушкой. Электронный пучок последовательно попадает на все элементы одной строчки мозаики, затем другой и т. д. От того, насколько сильно меняется заряд ячейки, зависит сила тока в импульсе, протекающем по резистору (сопротивлению) R. Поэтому напряжение на резисторе R изменяется пропорционально изменению освещенности вдоль строк кадра.

Такой же сигнал получается в телевизионном приемнике после детектирования. Это *видеосигнал*. Он преобразуется в видимое изображение на экране приемной вакуумной электронной трубки — *кинескопа*. Электронная пушка такой трубки снабжена электродом, управляющим количеством электронов в пучке и,

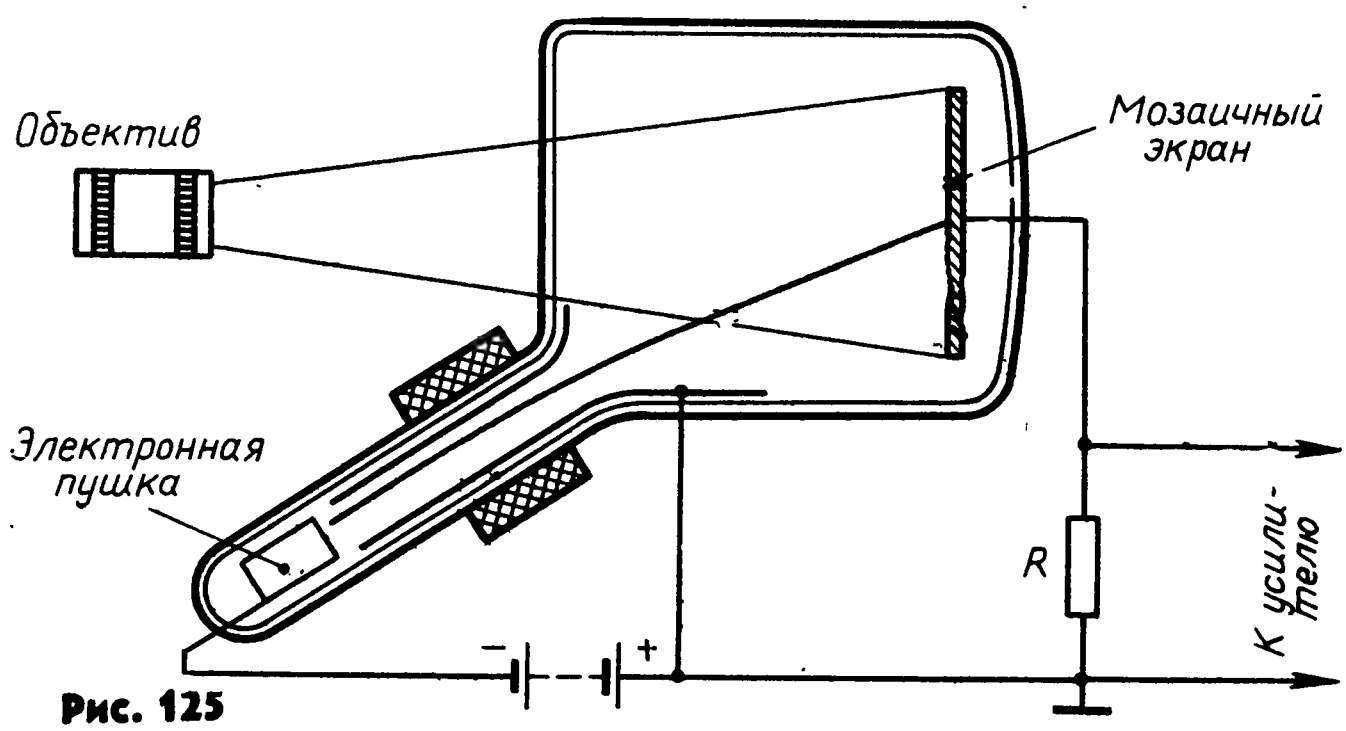


Рис. 125

следовательно, свечением экрана в месте попадания луча. Системы катушек горизонтального и вертикального отклонения заставляют электронный луч обегать весь экран точно таким же образом, как электронный луч обегает мозаичный экран в передающей трубке. Синхронность движения лучей в передающей и приемных трубках достигается посылкой специальных синхронизирующих сигналов.

Телевизионные радиосигналы могут быть переданы только в диапазоне ультракоротких (метровых) волн. Такие волны распространяются обычно лишь в пределах прямой видимости антенны. Поэтому для охвата телевизионным вещанием большой территории необходимо размещать телепередатчики чаще и поднимать их антенны выше. Останкинская телевизионная башня в Москве высотой 540 м обеспечивает уверенный прием телепередач в радиусе 120 км. В настоящее время телевизионная сеть в нашей стране насчитывает более 1000 вещательных станций. В стране имеются десятки миллионов телевизионных приемников (телевизоров). Зона уверенного приема телевидения непрерывно увеличивается, особенно благодаря использованию ретрансляционных спутников.

§ 64. РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ СВЯЗИ В СССР

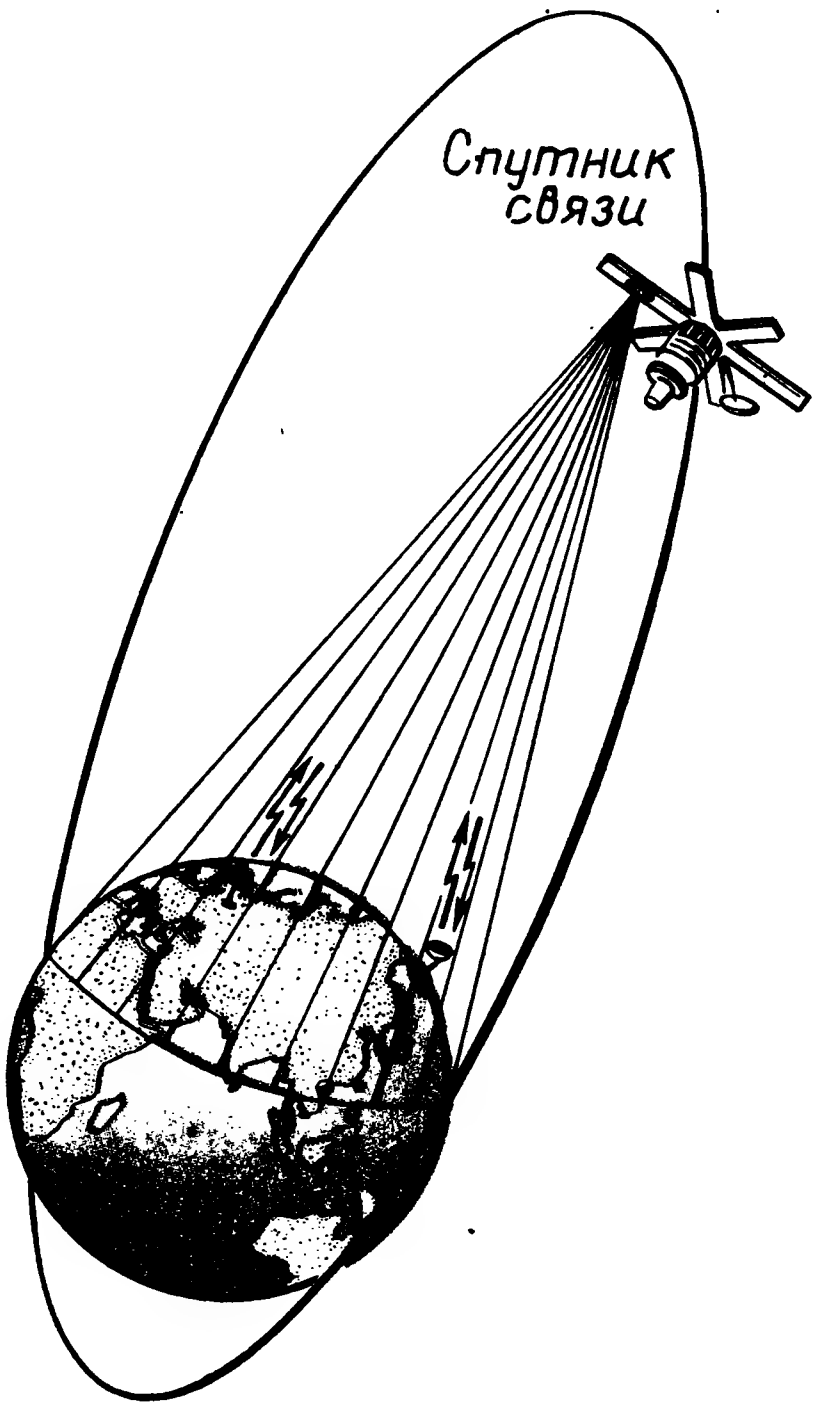


Рис. 126

В нашей стране создается единая автоматизированная система связи. Для этого непрерывно развиваются, совершенствуются и находят новые области применения различные технические средства связи.

Так, еще недавно междугородная телефонная связь осуществлялась исключительно по воздушным линиям связи, чувствительным к грозам и гололеду. В настоящее время повышается уровень автоматизации такой связи и все шире применяются кабельные и радиорелейные линии.

Радиорелейные линии связи используют ультракороткие (дециметровые и сантиметровые) волны. Эти волны распространяются в пределах прямой видимости. Поэтому линии состоят из цепочки маломощных радиостанций, каждая из которых передает сигналы к сосед-

ней как бы по эстафете. Такие станции имеют мачты высотой 60—80 м, находящиеся на расстоянии 40—60 км друг от друга.

Достижения в области радиорелейных и кабельных линий не решают всех проблем связи. Например, радиорелейная линия Москва — Владивосток потребовала бы 150 наземных станций, а кабельная линия — тысячи километров дорогостоящего кабеля и сотни усилительных пунктов.

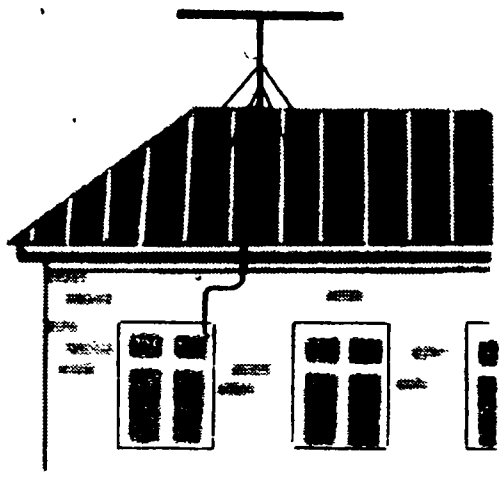


Рис. 127

Достижения в области космической радиосвязи позволили создать новую систему связи «Орбита». Система использует ретрансляционные спутники связи «Молния» (рис. 126). Спутники запускаются на сильно вытянутые орбиты. Период их обращения составляет около 12 ч. Созданы мощные и надежные системы, обеспечивающие телевизионным вещанием районы Сибири и Дальнего Востока и позволяющие осуществить телефонно-телеграфную связь с отдаленными районами нашей страны.

Успехи космической радиосвязи в нашей стране грандиозны. Достаточно упомянуть надежную связь с многочисленными спутниками, космическими кораблями и межпланетными станциями.

Совершенствуются и находят новые применения и такие сравнительно старые средства связи, как телеграф и фототелеграф.

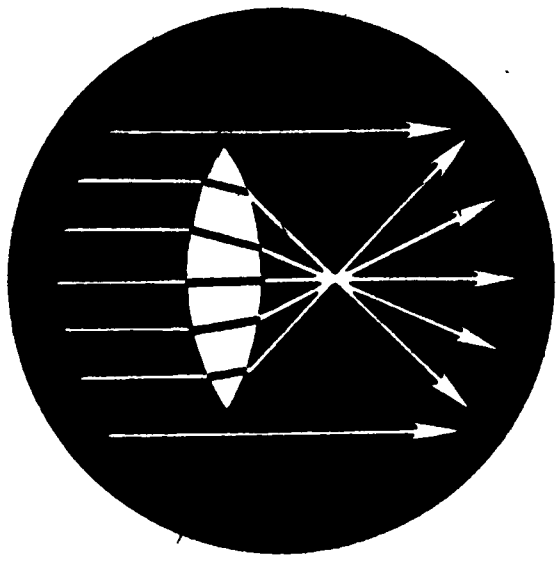
О размахе, который получила передача неподвижных изображений по фототелеграфу, можно судить по таким цифрам: в год по фототелеграфу передается до 70 тысяч газетных полос, с которых на местах печатается свыше 3 миллиардов экземпляров центральных газет. Количество пунктов приема газетных полос, передаваемых таким способом, быстро увеличивается.

?

1. Для чего применяется амплитудная модуляция высокочастотных сигналов?
2. В чем состоит процесс детектирования высокочастотных модулированных сигналов?
3. Перечислите известные вам свойства электромагнитных волн.
4. На каких принципах основана работа радиолокатора?

УПРАЖНЕНИЕ 5

1. Можно ли выбрать такую систему отсчета, в которой магнитная индукция в пространстве вокруг проводника с током равнялась бы нулю?
2. Передающий и приемный вибраторы расположены взаимно перпендикулярно. Возникнут ли колебания в приемном вибраторе?
3. В схеме радиоприемника, изображенной на рисунке 120, $L = 2 \cdot 10^{-4}$ Г, емкость C переменного конденсатора может меняться от 12 до 450 пФ. На какие длины волн рассчитан этот радиоприемник?
4. На рисунке 127 изображена приемная антенна телевизора. Что можно сказать об ориентации колебаний вектора магнитной индукции волны, идущей из телецентра?
5. Имеются ли существенные различия между условиями распространения радиоволн на Луне и на Земле?



ОПТИКА

ВВЕДЕНИЕ

(Развитие взглядов на природу света)

Первые представления древних ученых о том, что такое свет, были весьма наивны. Считалось, что из глаз выходят особые тонкие щупальца и зрительные впечатления возникают при ощупывании ими предметов. Останавливаться подробно на подобных воззрениях сейчас, разумеется, нет нужды. Мы проследим вкратце за развитием научных представлений о том, что такое свет.

Два способа передачи воздействий. От источника света, например лампочки, свет распространяется во все стороны и падает на окружающие предметы, вызывая, в частности, их нагревание. Попадая в глаз, он вызывает зрительное ощущение — мы видим. Можно сказать, что при распространении света происходит передача воздействий от одного тела (источника) к другому (приемнику).

Вообще же действие одного тела на другое может осуществляться двумя различными способами: либо посредством переноса вещества от источника к приемнику, либо же посредством изменения состояния среды между телами (без переноса вещества).

Можно, например, заставить зазвенеть колокольчик, находящийся на некотором расстоянии, удачно попав в него шариком (рис. 128). Это первая возможность — перенос вещества. Но можно поступить иначе: привязать шнур к языку колокольчика и заставить колокольчик звучать, посылая по шнуру волны, раскачивающие его язык (рис. 129). В этом случае переноса вещества не будет. По

веревке распространяется волна, т. е. происходит изменение состояния (формы) веревки. Таким образом передача действия от одного тела к другому может происходить посредством волн.

Корпускулярная и волновая теории света. В соответствии с двумя возможными способами передачи действия от источника к приемнику возникли и начали развиваться две совершенно различные теории о том, что такое свет, какова его природа. Причем возникли они почти одновременно в XVII веке.

Одна из этих теорий связана с именем Ньютона, а другая — с именем Гюйгенса.

Ньютон придерживался так называемой *корпускулярной*[1] *теории света,* согласно которой свет — это поток частиц, идущих от источника во все стороны (перенос вещества).

Согласно же представлениям Гюйгенса, свет — это поток волн, распространяющихся в особой, гипотетической среде — эфире, заполняющем все пространство и проникающем внутрь всех тел.

Обе теории длительное время существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет Ньютона заставлял большинство ученых отдавать предпочтение корпускулярной теории. Известные в то время из опыта законы распространения света более или менее успешно объяснялись обеими теориями.

На основе корпускулярной теории было трудно объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не действуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться.

Волновая же теория это легко объясняла. Волны, например на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния.

Однако прямолинейное распространение света, приводящее к образованию за предметами резких теней, трудно объяснить, исходя из волновой теории. По корпускулярной же теории прямолинейное распространение света является просто следствием закона инерции.

Такое неопределенное положение относительно природы света длилось до начала XIX века, когда были открыты явления дифракции света (огибания светом препятствий) и интерференции света (усиление или ослабление освещенности при наложении световых пучков друг на друга). Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Максвелл во второй половине XIX века показал, что свет есть частный случай

---

[1] Латинское слово *корпускула* в переводе на русский язык означает частица.

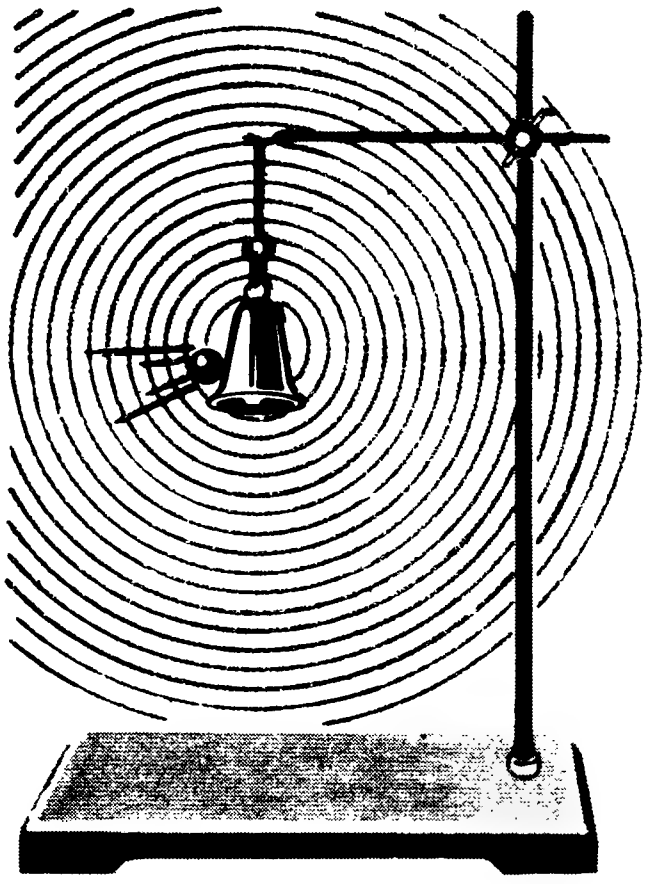


Рис. 128

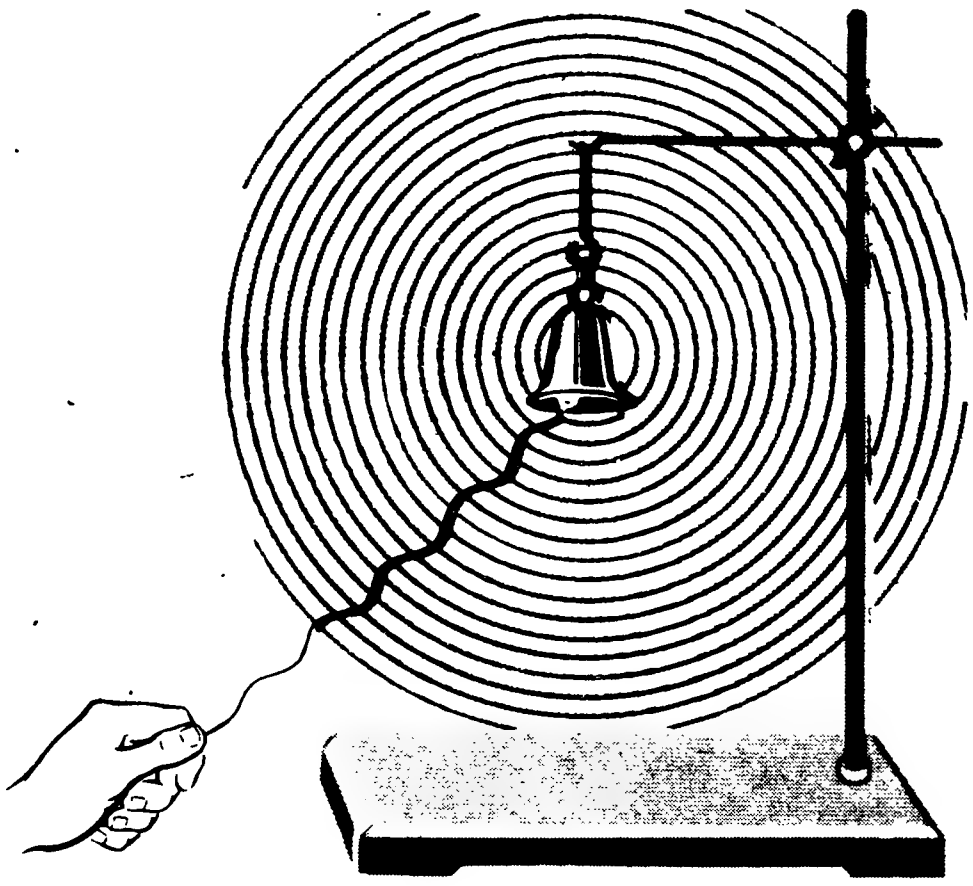


Рис. 129

электромагнитных волн. Работами Максвелла были заложены основы электромагнитной теории света.

После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем никаких сомнений в том, что **при распространении свет ведет себя как волна,** не осталось. Нет их и сейчас.

Однако в начале XX века представления о природе света начали коренным образом изменяться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория все же имеет отношение к действительности.

При излучении и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц.

Были обнаружены прерывистые, или, как говорят, квантовые, свойства света. Возникла необычная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно было объяснить, считая свет волной, а явления излучения и поглощения — считая свет потоком частиц. Эти два, казалось бы, несовместимых друг с другом представления о природе света в 30-х годах XX века удалось непротиворечивым образом объединить в новой выдающейся физической теории — квантовой электродинамике.

В дальнейшем выяснилось, что двойственность свойств присуща не только свету, но и любой другой форме материи.

Ниже мы познакомимся с волновыми и корпускулярными свойствами света.

Предварительно же мы рассмотрим законы распространения света, составляющие содержание так называемой *геометрической* или *лучевой* оптики.

Глава VI

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

§ 65. СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ

Направление распространения любых волн, в том числе и световых, определяется с помощью *лучей* — линий, перпендикулярных волновым поверхностям (см. § 40) и указывающих направление распространения энергии волны. Направление пучка световых лучей можно найти экспериментально, если поставить на пути света непрозрачный экран с небольшим отверстием (рис. 130). Тогда в задымленной комнате мы увидим путь света в виде узкого, прямолинейного канала — *светового пучка.*

Казалось бы, уменьшая отверстие, можно сузить этот пучок до линии и таким образом сколь угодно точно установить направление распространения света. Но в действительности с уменьшением отверстия пучок сжимается лишь до тех пор, пока диаметр отверстия остается значительно большим длины световой волны. Когда же диаметр отверстия по порядку величины оказывается сравнимым с длиной волны, становится заметным расширение пучка за счет дифракции. Свет огибает края экрана, подобно тому как это происходит с волнами на поверхности воды (см. рис. 97). Поэтому получить сколь угодно тонкий пучок света, который можно было бы назвать световым лучом, мы не можем.

Под световым лучом понимают не тонкий световой пучок, а линию, указывающую направление распространения световой энергии. Чтобы определить это направление, мы выделяем узкие световые пучки, диаметр которых все же должен превосходить длину волны. Затем мы заменяем эти пучки линиями, которые являются как бы осями световых пучков. Эти линии и изображают световые лучи. Следовательно, говоря об отражении или преломлении световых лучей, мы имеем в виду изменение направления распространения света.

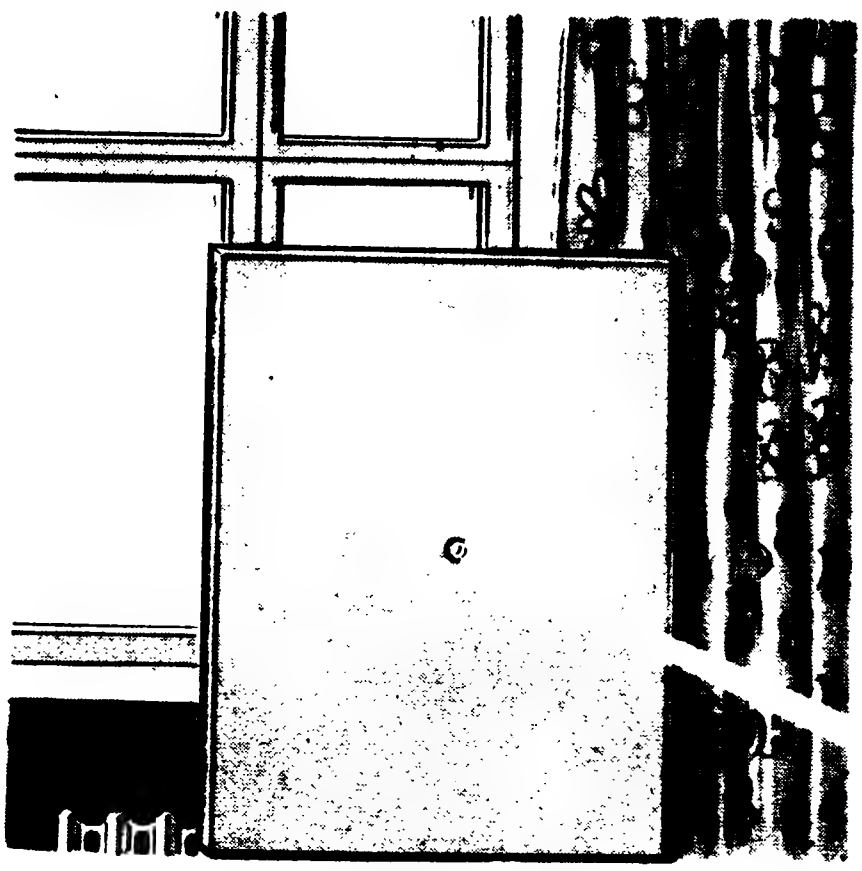


Рис. 130

Основная польза от введения понятия светового луча заключается в том, что поведение лучей в пространстве опре деляется простыми законами — *законами геометрической оптики.*

Геометрической оптикой называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения в прозрачных средах световой энергии на основе представления о световом луче.

Эти законы были установлены экспериментально задолго до выяснения природы света. Но они вытекают из волновой теории света как приближение, справедливое, если длина волны много меньше размеров препятствий, которые расположены не очень далеко от места наблюдения.

В этой главе мы познакомимся с законами геометрической оптики и их многочисленными применениями для расчета оптических приборов: очков, фотоаппаратов, микроскопов и др.

§ 66. ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА

В однородной среде, как показывают наблюдения, **свет распространяется прямолинейно.** Другими словами, в однородной среде световые лучи представляют собой прямые линии [1].

Чтобы доказать это, проведем по линейке отрезок прямой линии на листе бумаги, картона или на доске. Воткнем у концов отрезка и в его середине по булавке и посмотрим вдоль начерченной линии. Если линия прямая, то ближайшая к нам булавка будет заслонять остальные. Это означает, что световые лучи, идущие вдоль прямой от дальней булавки как от источника света, не попадают к нам в глаза, так как на их пути встречается непрозрачная преграда. Глядя вдоль начерченной линии, можно таким образом проверить ее прямолинейность.

Прямолинейностью распространения света объясняется образование *тени,* т. е. области, куда не поступает световая энергия. При малых размерах источника (светящаяся точка) получается резко очерченная тень (рис. 131). При больших размерах источника создаются нерезкие тени (рис. 132). Дело в том, что от каждой точки источника свет распространяется прямолинейно и предмет, освещенный уже двумя светящимися точками, даст две несовпадающие тени, наложение которых образует тень неравномерной густоты. Полная тень при протяженном источнике образуется лишь в тех участках экрана, куда свет не попадает совсем. По краям полной тени располагается более светлая область. Это полутень. По мере удаления от области полной тени полутень становится все более и более светлой. Из области полной тени глаз совсем не увидит источника света, а из области полутени он увидит лишь часть его поверхности (рис. 133).

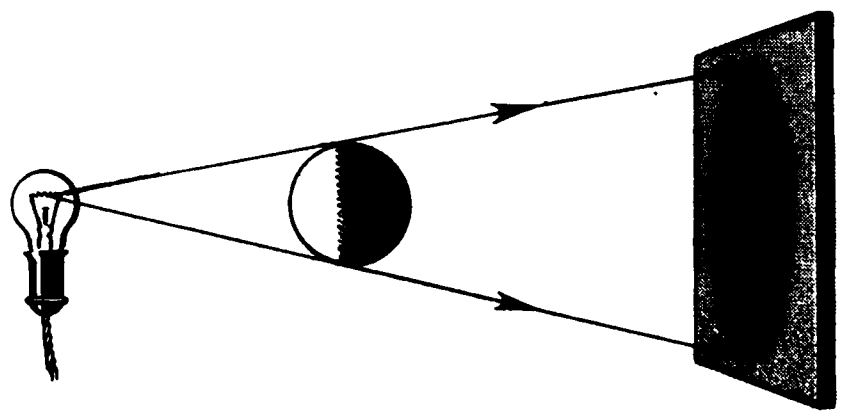


Рис. 131

[1] Термин *луч* в геометрии, как и понятие прямой линии, возник на основании представлений о световых лучах.

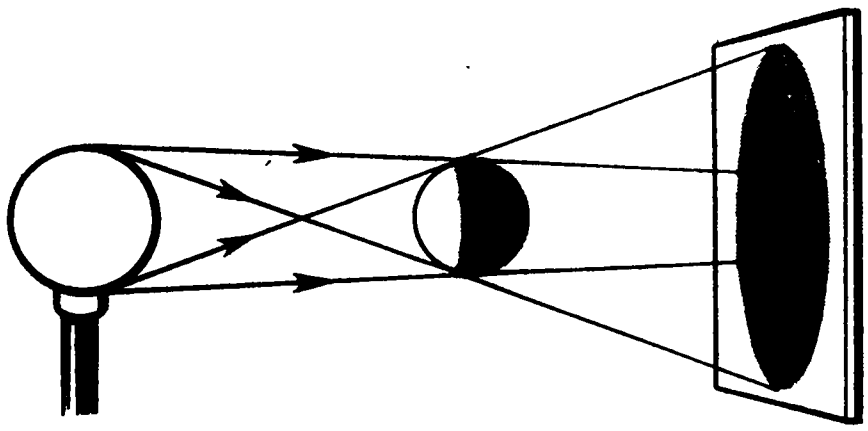


Рис. 132

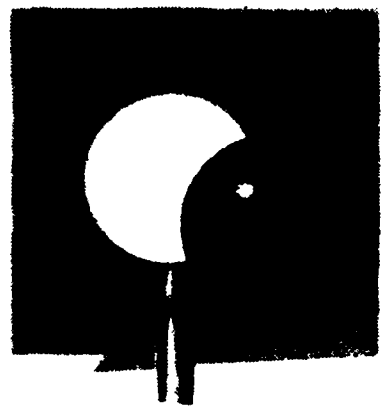


Рис. 133

Во многих случаях тень вообще не образуется. Так, в пасмурный день нельзя увидеть тени от столбов, домов и других предметов. При хирургических операциях операционное поле освещают особыми бестеневыми лампами.

§ 67. ФОТОМЕТРИЯ. СВЕТОВОЙ ПОТОК. СИЛА СВЕТА

Свет оказывает действие на тела благодаря тому, что он переносит энергию. Согласно теории Максвелла световая энергия — это энергия электромагнитных волн. Методы измерения световой энергии составляют раздел оптики, называемый *фотометрией.*

Ряд величин характеризует свет с точки зрения переносимой им энергии. Важнейшей из них является *световой поток.* Для восприятия световой энергии особое значение, естественно, имеет глаз. Поэтому нас в первую очередь интересует не полная энергия, переносимая электромагнитными волнами, а лишь ее часть, на которую реагирует наш глаз. Очень длинные электромагнитные волны (радиоволны) и очень короткие (например, γ-лучи, о которых упоминалось в VII классе) совсем не воспринимаются глазом.

Световой поток. Наиболее чувствителен глаз к зеленым лучам. Поэтому практически важно знать не просто количество световой энергии, регистрируемое соответствующими измерительными приборами, а интенсивность света, оцениваемую непосредственно нашим глазом. Для такой оценки световой энергии введена особая физическая величина — *световой поток* (обозначается буквой Ф).

Световым потоком называют протекающую через некоторую поверхность в единицу времени световую энергию, оцениваемую по зрительному ощущению.

Другими словами, световой поток — это мощность светового излучения, оцениваемая непосредственно нашим глазом.

Световой поток создается источником света и воздействует на окружающие предметы. Соответственно вводятся еще две энергетические величины: одна для характеристики источника света — *сила света* источника, а другая для характеристики действия света на поверхности тел — *освещенность.* Понятие силы света проще всего ввести для так называемого *точечного источника света.*

Точечный источник. Источник света считается *точечным*, если его размеры много меньше расстояний, на которых оценивается его действие. Кроме того, предполагается, что такой источник посылает свет равномерно по всем направлениям. Так, например, расстояния до звезд настолько превосходят их размеры, что именно звезды являются лучшей моделью точечного источника, несмотря на то что размеры их огромны. Вводя понятие точечного источника света, мы выделяем лишь существенные для фотометрии свойства реальных источников, отвлекаясь от второстепенных свойств. Точечный источник является такой же идеализацией, как и другие модели, принятые в физике,— материальная точка, абсолютно твердое тело, идеальный газ и т. п.

Телесный угол. Для описания распределения светового потока, испускаемого источником света по разным направлениям, используется понятие *телесного угла.*

Рассмотрим площадку произвольной формы и мысленно проведем из некоторой точки прямые линии ко всем точкам кривой, ограничивающей эту площадку (рис. 134). Эти линии выделят в пространстве область в форме конуса. Такая область пространства называется *телесным углом* Ω. Вообразим сферу радиуса R с центром в вершине угла. Телесный угол Ω «вырезает» на поверхности сферы сферический сегмент площадью S. Под величиной телесного угла Ω понимают отношение этой площади к квадрату радиуса сферы:

$$\Omega = \frac{S}{R^2}. \qquad (6.1)$$

Нетрудно понять, что значение телесного угла не зависит от радиуса сферы, так как вырезаемая им площадь S пропорциональна квадрату радиуса. Единица телесного угла называется стерадианом (ср). Телесный угол в один стерадиан вырезает на сфере площадь, равную квадрату радиуса сферы. Полный телесный угол, охватывающий все пространство вокруг точки, равен:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ ср}. \qquad (6.2)$$

Сила света. Силой света источника называется световой поток, созданный источником в единичном телесном угле. Если источник создает в телесном угле Ω световой поток Φ, то сила света источника I по определению равна:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \qquad (6.3)$$

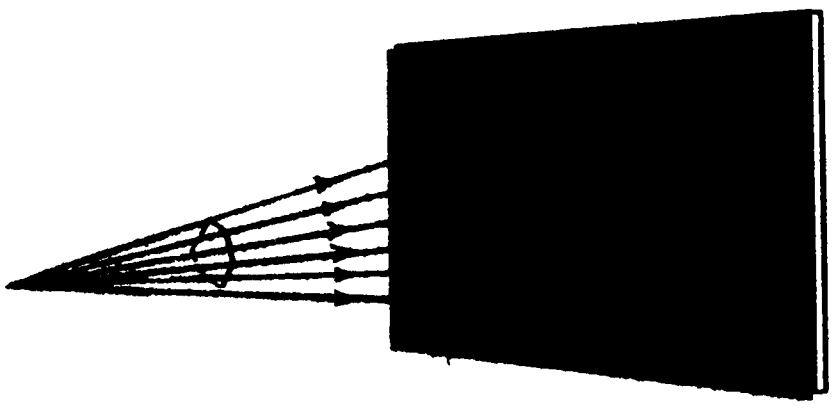


Рис. 134

Так как полный телесный угол содержит 4π ср, то сила света точечного источника

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}, \qquad (6.4)$$

где Ф — полный световой поток источника, т. е. мощность светового излучения, распространяющегося по всем направлениям от источника, оцениваемая по зрительному ощущению.

В Международной системе единиц СИ за основную единицу фотометрических величин принята единица силы света к а н д е л а (кд)[1]. Дело в том, что проще всего создать эталон именно для силы света. Эталоном единицы силы света (1 кд) служит специальный излучатель. Все остальные световые единицы, в том числе и единица светового потока, являются производными.

Единица светового потока. За единицу светового потока принимается л ю м е н (лм); **1 лм — это световой поток, испускаемый точечным источником, сила света которого 1 кд, в телесный угол, равный 1 ср.**

§ 68. ОСВЕЩЕННОСТЬ

Источник света почти всегда освещает поверхности предметов неравномерно. Так, лампа, висящая над столом, лучше всего освещает центр стола. Края стола освещены значительно хуже. И дело здесь не только в том, что сила света электрической лампы различна по различным направлениям. Даже в случае точечного источника на площадку в центре стола придется бóльшая световая мощность (световой поток), чем на такую же площадку на краю.

Освещенностью E называется отношение светового потока Ф, падающего на некоторый участок поверхности, к площади S этого участка:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \qquad (6.5)$$

Единица освещенности — л ю к с (лк) — определяется как освещенность, при которой на 1 м^2 поверхности равномерно распределен световой поток в 1 лм.

Для фотометрических расчетов важно знать, как зависит освещенность E какой-либо поверхности от ее расположения по отношению к падающим лучам, от расстояния R до источника света и от силы света I источника.

Очевидно, что при прочих равных условиях **освещенность прямо пропорциональна силе света источника.** В самом деле, два находящихся рядом одинаковых источника будут посылать в данном направлении в два раза больше световой энергии в единицу времени, чем один источник. Но такие два источника можно заменить одним, сила света которого в два раза больше.

Выяснить зависимость освещенности от расстояния до источника можно, поместив мысленно точечный источник в центр сферы. Площадь поверхности сферы равна $S=4\pi R^2$, а полный све-

---

[1] Ранее эта единица называлась с в е ч о й.

товой поток равен $\Phi = 4\pi I$ (см. формулу 6.4). Поэтому освещенность выразится так:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}.$$

Следовательно, **освещенность поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.**

В рассмотренном случае лучи падали на поверхность сферы перпендикулярно. Но так происходит далеко не всегда. Направление падающих на площадку лучей принято характеризовать *углом падения.*

Углом падения луча называют угол α между падающим лучом и перпендикуляром, восставленным к поверхности в точке падения луча (рис. 135).

Угол падения лучей на поверхность сферы от источника, расположенного в ее центре, равен нулю.

Выясним теперь, как изменится освещенность какой-либо площадки, если при том же расстоянии площадки от источника угол падения лучей будет отличен от нуля.

Для этого рассмотрим очень маленький участок на внутренней поверхности той же сферы. Если размеры этого участка значительно меньше радиуса сферы, его можно считать плоским, а лучи, падающие на него, приблизительно параллельными. Пусть площадь участка равна ΔS_0 (рис. 136). Рассмотрим другую площадку, на которую от источника падает тот же световой поток, что и на первую. Если вторая площадка составляет с первой угол α, то угол падения на нее лучей из центрального источника также будет равен α. Площадь второй площадки равна ΔS. Как легко видеть из рисунка, обе площадки имеют одинаковую ширину a, но различные длины b и b_0, причем

$$\frac{b_0}{b} = \cos\alpha.$$

Поэтому

$$\frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \frac{ab_0}{ab} = \cos\alpha.$$

При одном и том же световом потоке $\Delta\Phi$ освещенности обеих площадок не будут одинаковыми:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad E_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S_0}.$$

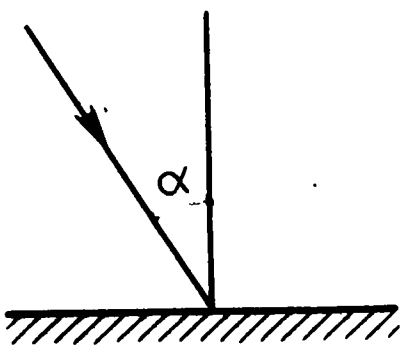


Рис. 135

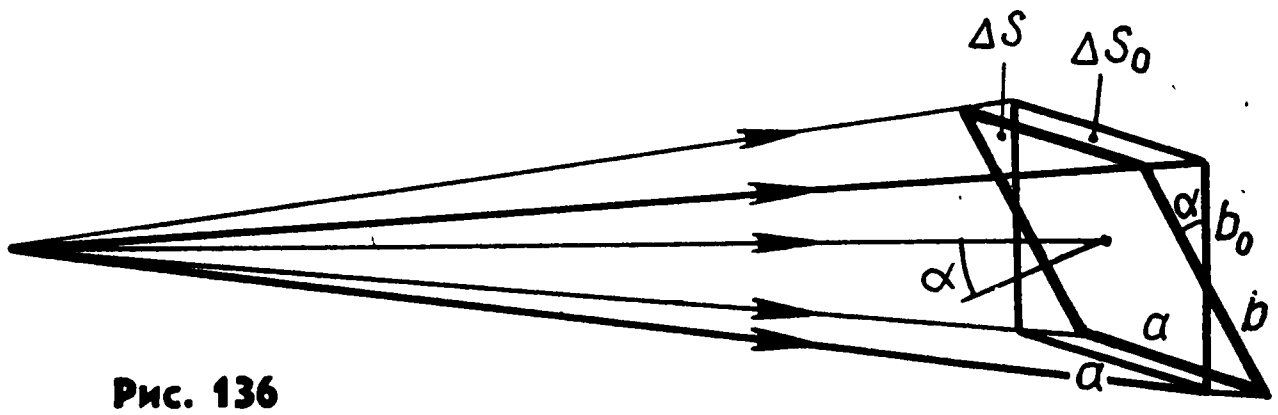


Рис. 136

Следовательно,

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \cos\alpha.$$

Таким образом, освещенность E наклонной площадки связана с освещенностью E_0 площадки, перпендикулярной лучам, так:

$$E = E_0 \cos\alpha. \qquad (6.6)$$

Это значит, что **освещенность поверхности прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей.**

Объединив полученные результаты, можно сформулировать общее правило.

Освещенность поверхности, создаваемая точечным источником, прямо пропорциональна силе света источника, косинусу угла падения лучей и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности:

$$E = \frac{I}{R^2} \cos\alpha. \qquad (6.7)$$

Если источников несколько, то общая освещенность равна сумме освещенностей, созданных каждым источником в отдельности.

Для измерения освещенности применяются особые приборы — *люксметры.* Действие прибора, которым фотографы пользуются для определения экспозиции при фотографировании,— *фотоэкспонометра* тоже основано на измерении освещенности.

С целью сохранения нормального зрения людей в нашей стране установлены гигиенические нормы освещенности жилых и служебных помещений, обеспечивающие наилучшие условия работы и быта. Так, освещенность классной доски должна быть равна 150 лк, а освещенность школьной лестницы 30 лк.

?

1. Что называют световым лучом?
2. Что называют световым потоком?
3. Что называют силой света?
4. От чего зависит освещенность поверхности, создаваемая точечным источником света?

УПРАЖНЕНИЕ 6

1. Пучок света входит в коробку через отверстие в боковой стенке и выходит через отверстие в противоположной стенке. Увидите ли вы световой пучок, заглянув в коробку через отверстие в передней стенке, если воздух в коробке чист?
2. Как выглядит для наблюдателя солнечное затмение, когда Земля попадает в область полутени Луны?
3. «Комната, в которую вступил Иван Иванович, была совершенно темна, потому что ставни были закрыты, и солнечный луч, проходя в дыру, сделанную в ставне, принял радужный цвет и, ударяясь в противоположную стену, рисовал на ней пестрый ландшафт из крыш, деревьев и развешенного на дворе платья, все только в обращенном виде» (Н. В. Гоголь «Повесть о том, как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем»). Объясните происхождение этого явления.

4. Почему тень ног на земле от фонаря резко очерчена, а тень головы более расплывната?

5. Лампа, расположенная над станком на высоте 1,1 м, создает освещенность на рабочем месте 50 лк. По нормам освещенность не должна отличаться от 50 лк более чем на 10 лк в ту и другую сторону. На какой высоте может находиться над станком лампа?

6. Два точечных источника света, силы света которых $I_1=80$ кд и $I_2=125$ кд, находятся друг от друга на расстоянии $l=3{,}6$ м. Где на прямой, соединяющей источники, надо поместить небольшой плоский экран, чтобы его освещенность была одинакова с обеих сторон? Изменится ли ответ, если экран не будет перпендикулярен прямой, соединяющей источники?

7. Комната освещается двумя лампами, размещенными на высоте $h=3$ м от пола на расстоянии $l=4$ м друг от друга. Считая лампы точечными источниками силой света $I=200$ кд каждая, определить освещенность пола под каждой лампой и посредине между лампами. Влияние на освещенность света, отраженного от потолка и стен, не учитывать.

§ 69. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА. ИЗОБРАЖЕНИЕ В ПЛОСКОМ ЗЕРКАЛЕ

Луч света, распространяющегося в однородной среде, является прямолинейным, пока он не дойдет до границы этой среды с другой средой. На границе двух сред луч меняет свое направление. Часть света (а в ряде случаев и весь свет) возвращается в первую среду. Это явление называется *отражением света.*

Закон отражения света. Закон отражения света определяет взаимное расположение падающего луча AB, отраженного луча BD и перпендикуляра BC к поверхности, восставленного в точке падения (рис. 137, *а*).

В § 47 рассматривалось отражение механических волн. Мы видели, что при отражении волн угол падения равен углу отражения. Этот закон справедлив для волн любой природы и формулируется так: **падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения γ равен углу падения α.**

Очевидно, что этот закон будет выполняться, если распространение света будет происходить в обратном направлении (рис. 137, *б*). Обратимость хода световых лучей является их важным свойством.

Убедиться в справедливости закона отражения света можно на опыте. Для этого в центре диска (рис. 138) укрепляют плоское зеркало или кусок стекла с плоской гранью так, чтобы отражающая поверхность совпадала с диаметром диска. От специального осветителя, который можно перемещать по окружности, на отражающую поверхность падает узкий пучок света. Падающий и отраженный лучи оставляют световые дорожки на белой поверхности диска. Меняя угол падения от 0 до 90°, можно наблюдать за изменением угла отражения. Перпендикуляром, восставленным к плоскости зеркала в точке падения луча, служит

при этом вертикальный диаметр диска. Наблюдения подтверждают закон отражения света и обратимость хода лучей при отражении.

Изображение в плоском зеркале. Пусть светящаяся точка находится перед плоской отражающей свет поверхностью, т. е. плоским зеркалом. Поставим вопрос: где мы увидим изображение этой точки, если посмотрим в зеркало? Для ответа на этот вопрос построим несколько лучей, выходящих из точки S и попадающих после отражения (рис. 139) в глаз наблюдателя. Человеку кажется, что лучи выходят из точки S_1, которую можно найти, продолжив лучи в противоположную сторону до пересечения. Точка S_1 поэтому будет являться изображением точки в плоском зеркале. Это изображение называется *мнимым,* так как в точке S_1 пересекаются не сами отраженные лучи, а их продолжения, световая энергия в эту точку не поступает

Рассмотрим любые два луча расходящегося пучка, например крайние лучи пучка, попадающего в глаз,— лучи AB и CD. В треугольниках SAC и S_1AC сторона AC общая. Используя закон отражения, можно доказать, что углы в треугольниках, прилегающие к этой общей стороне, соответственно конгруэнтны. Следовательно треугольники конгруэнтны и совместятся друг с другом, если перегнуть рисунок по линии зеркала. Это означает, что точка S_1 расположена с и м м е т р и ч н о точке S относительно зеркала. Поэтому для

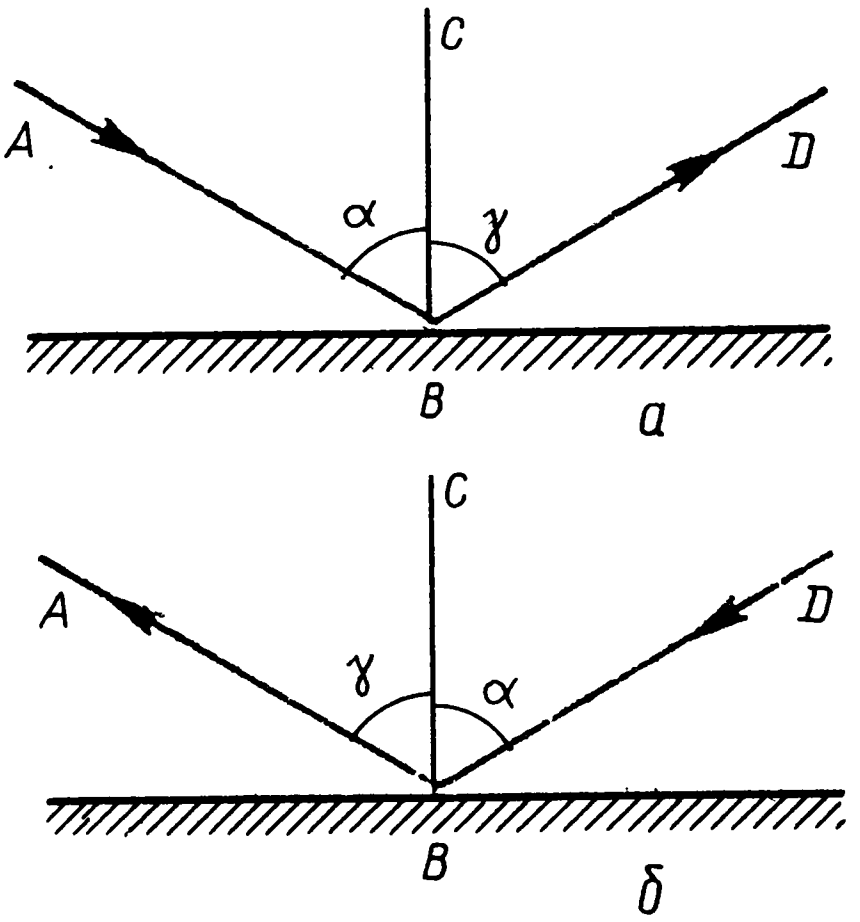


Рис. 137

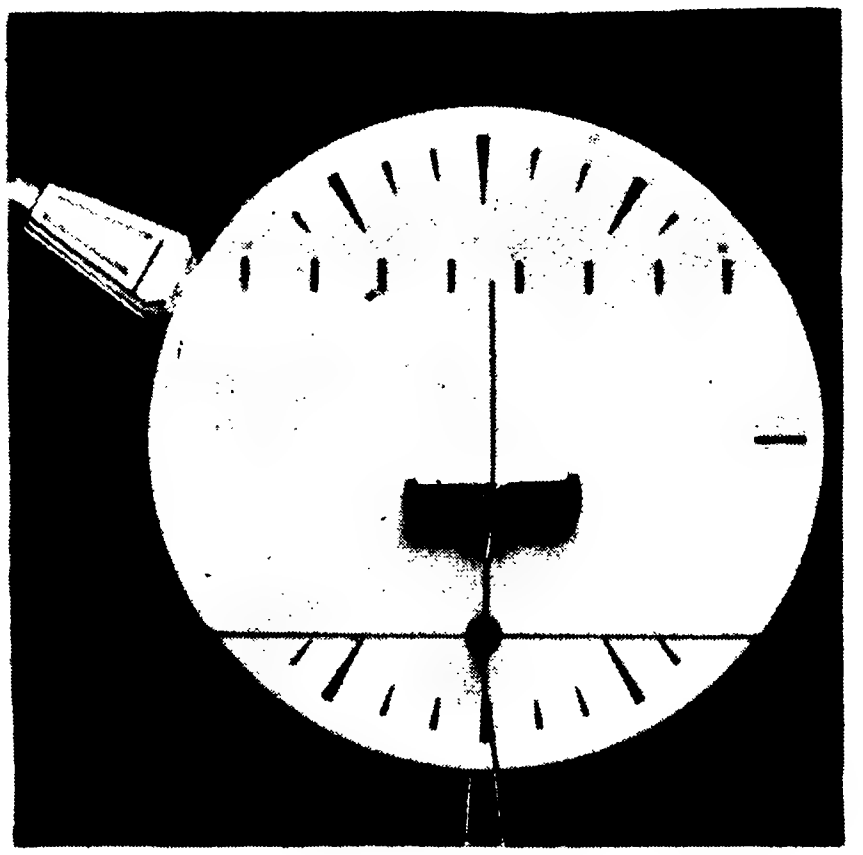


Рис. 138

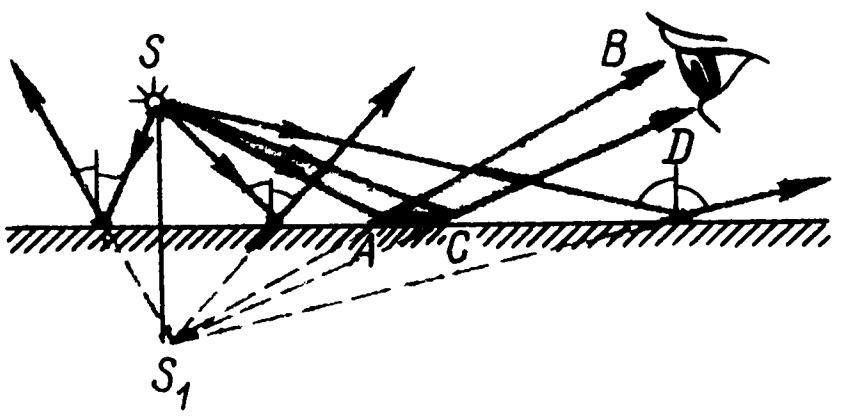


Рис. 139

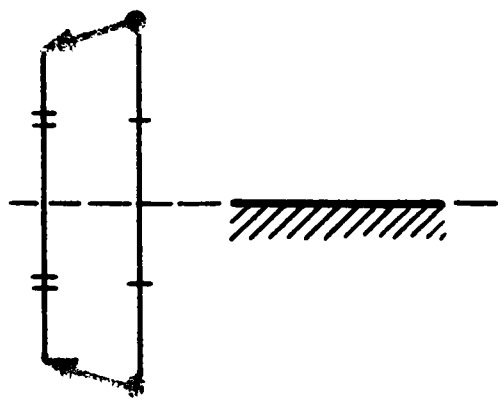


Рис. 140

нахождения изображения точки достаточно опустить из нее на зеркало или на его продолжение перпендикуляр и продолжить его на такое же расстояние за зеркало.

Изображение предмета в плоском зеркале равно по размеру самому предмету (рис. 140).

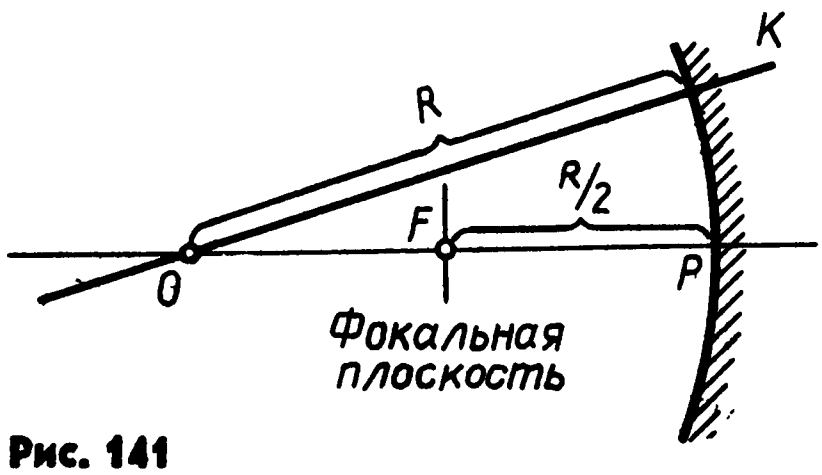


Рис. 141

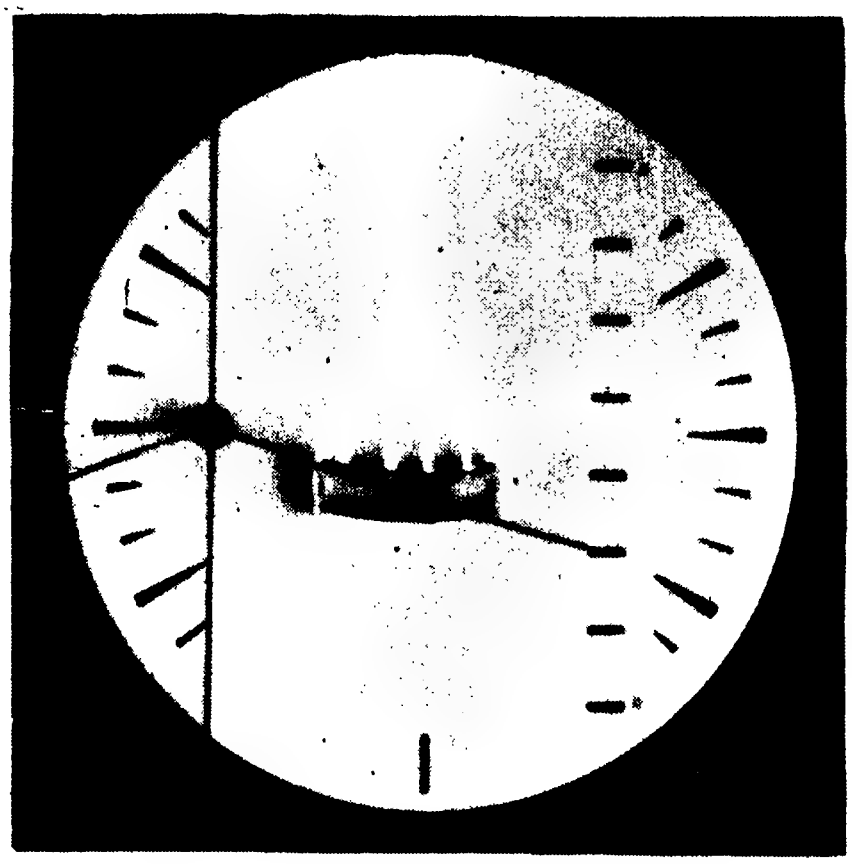


Рис. 142

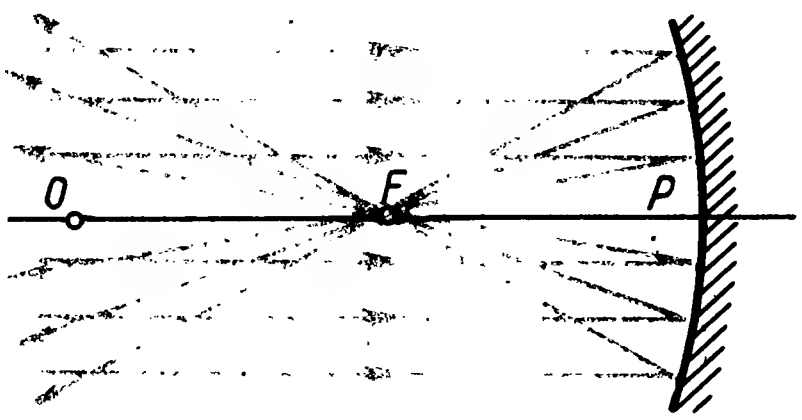


Рис. 143

§ 70. СФЕРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО

Гладкая изогнутая поверхность тоже отражает световые лучи. Зеркальные шары, украшающие новогоднюю елку, выпуклые зеркала, устанавливаемые иногда на перекрестках дорог, сферические зеркала в телескопах — вот примеры изогнутых поверхностей, с помощью которых образуются изображения. Размеры этих изображений уже не равны размерам соответствующих предметов, как в плоском зеркале, и расположение изображений иное. Из всех возможных кривых зеркал мы ограничимся рассмотрением зеркал сферической формы.

Сферическим зеркалом называют поверхность тела, имеющую форму сферического сегмента и зеркально отражающую свет. Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют *оптическим центром зеркала* (точка *O* на рис. 141).

Вершину сферического сегмента называют *полюсом зеркала* — точка *P*. Любую прямую, проходящую через оптический центр, называют *оптической осью зеркала* — прямые *OP, OK* и др.

Среди оптических осей принято выделять одну главную. *Главной оптической осью* называют прямую, проходящую через оптический центр и полюс зеркала,— прямую *OP*. Главная оптическая ось отличается от остальных оптических осей, которые можно назвать *побочными,* лишь тем, что она является осью симметрии зеркала.

Если лучи отражаются от внутренней поверхности сферического сегмента, то зеркало называют *вогнутым.* В случае же отражения лучей от наружной поверхности зеркало будет *выпуклым.*

Вогнутое зеркало. Отражение от сферических зеркал можно наблюдать на том же приборе, на котором мы наблюдали отражение от плоской поверхности. Для этого вогнутое зеркало устанавливают в центре диска и направляют на него несколько параллельных лучей так, чтобы средний луч после отражения менял свое направление на противоположное. Боковые лучи после отражения пересекаются со средним лучом в одной точке (рис. 142).

Точка, в которой пересекаются после отражения лучи, падающие на сферическое зеркало параллельно главной оптической оси, называется *главным фокусом зеркала* (рис. 143) [1].

Если пучок лучей падает параллельно побочной оптической оси (рис. 144), то после от-

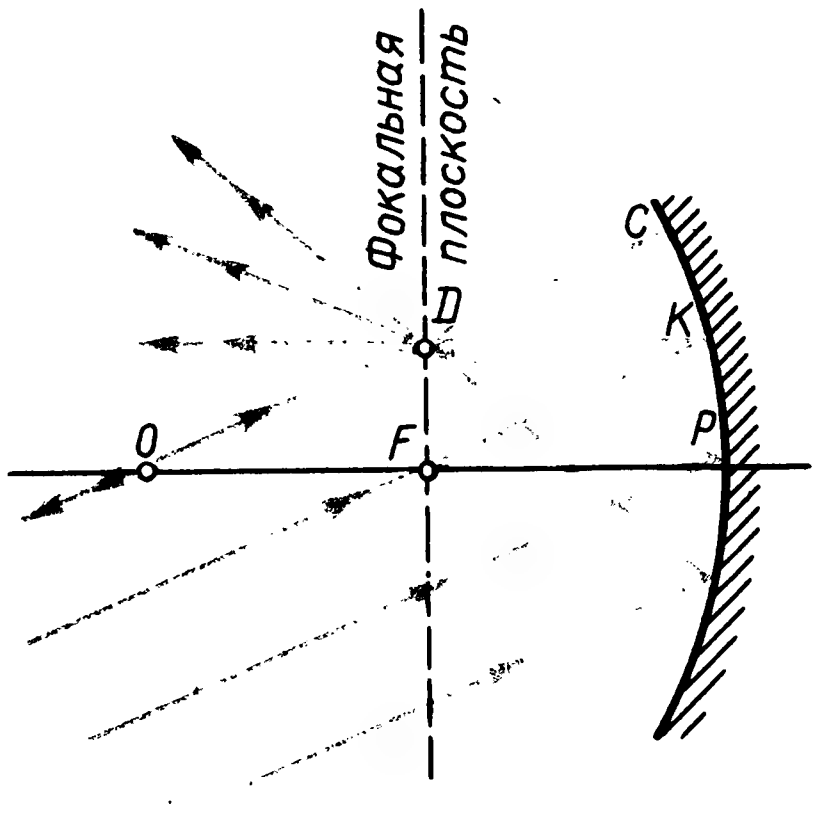


Рис. 144

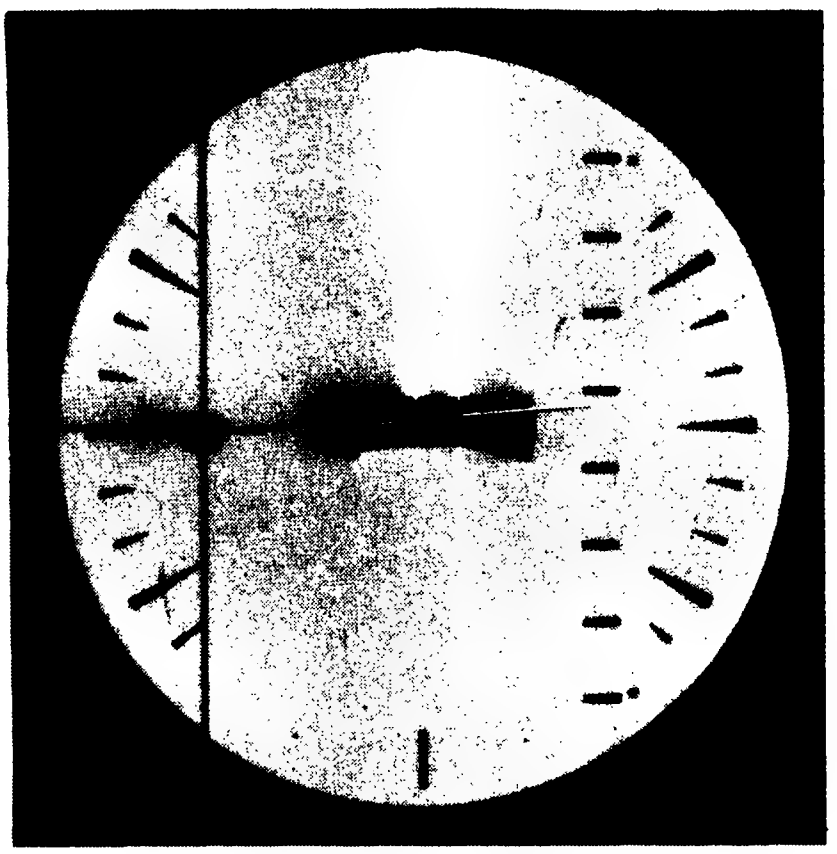


Рис. 145

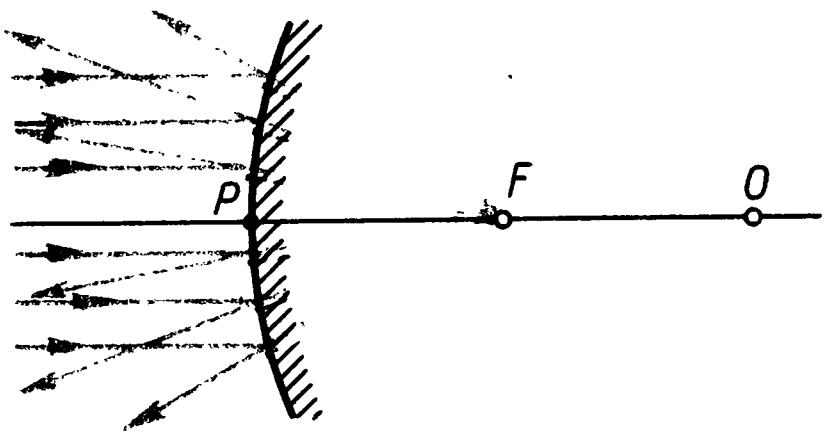


Рис. 146

[1] В действительности в одиой точке пересекаются лучи, идущие на небольшом по сравнению с радиусом зеркала расстоянии от оптической оси.

ражения лучи сходятся в точке, удаленной от зеркала на такое же расстояние, что и главный фокус. Совокупность всех подобных точек образует определенную поверхность. Рассматривая лишь малые углы между главной и побочной осями, мы приближенно можем считать эту поверхность плоскостью, перпендикулярной главной оси. Она называется *фокальной плоскостью зеркала.*

Направим теперь боковые лучи осветителя так, чтобы они сходились в главном фокусе. Пройдя главный фокус, лучи расходящимся пучком падают на зеркало, причем точка, из которой лучи расходятся, играет роль светящейся точки. Нетрудно убедиться в том, что после отражения от зеркала лучи идут параллельно главной оптической оси. Здесь мы снова наблюдаем обратимость хода световых лучей.

Будем теперь отодвигать точку пересечения лучей, играющую роль источника, дальше от зеркала. Отраженные лучи в этом случае оказываются сходящимися. Они пересекаются в одной точке, т. е. дают действительное изображение. Наоборот, если приближать источник к зеркалу, отраженные лучи становятся расходящимися. Их продолжения пересекаются в одной точке, образуя мнимое изображение [1].

Выпуклое зеркало. Такие же опыты можно провести с выпуклым зеркалом. Укрепив его в центре диска, направляем на него лучи, параллельные главной оптической оси. Отраженные лучи будут расходящимися (рис. 145). Их продолжения пересекаются в определенной точке, находящейся за зеркалом. Эту точку называют *главным фокусом выпуклого зеркала.* В данном случае в фокусе пересекаются не сами отраженные лучи, а их продолжения. Это означает, что главный фокус выпуклого зеркала является мнимым (рис. 146).

Расстояние, на котором находится от зеркала главный фокус, называется *фокусным расстоянием сферического зеркала* и обозначается обычно буквой F (той же буквой, что и фокус).

§ 71. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКОМ ЗЕРКАЛЕ

Зная, где расположен предмет по отношению к сферическому зеркалу, можно графическим построением определить, где получится изображение. Для этого надо уметь строить изображение любой точки предмета. Построение изображения точки осуществляется с помощью линейки и циркуля и сводится к выяснению направления произвольного луча после его отражения от зеркала.

Построение отраженного луча производится так. Проведем побочную оптическую ось параллельно падающему лучу AC

---

[1] В действительности отраженные лучи или их продолжения можно считать пересекающимися в одной точке, если они падают на зеркало под малыми углами к главной оптической оси.

(рис. 147). Она пересечет фокальную плоскость зеркала в точке D. Через эту точку и пройдет отраженный луч CD.

Этот способ построения легко обосновать. Пучок лучей, параллельных побочной оптической оси, после отражения сходится в точке, лежащей в фокальной плоскости (см. рис. 144). Поскольку через эту точку проходят все отраженные лучи, то для ее отыскания достаточно рассмотреть один из лучей. Можно взять луч, проходящий через оптический центр O, т. е. совпадающий с побочной оптической осью. После отражения этот луч идет по той же оптической оси и проходит через искомую точку D. Следовательно, точка D лежит одновременно в фокальной плоскости и на побочной оптической оси, т. е. является точкой их пересечения.

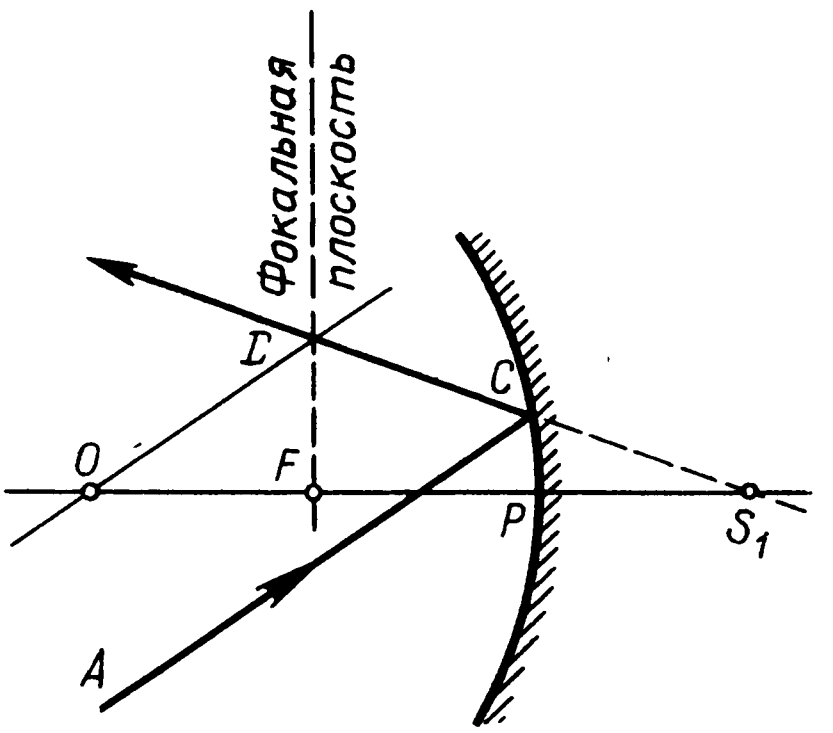


Рис. 147

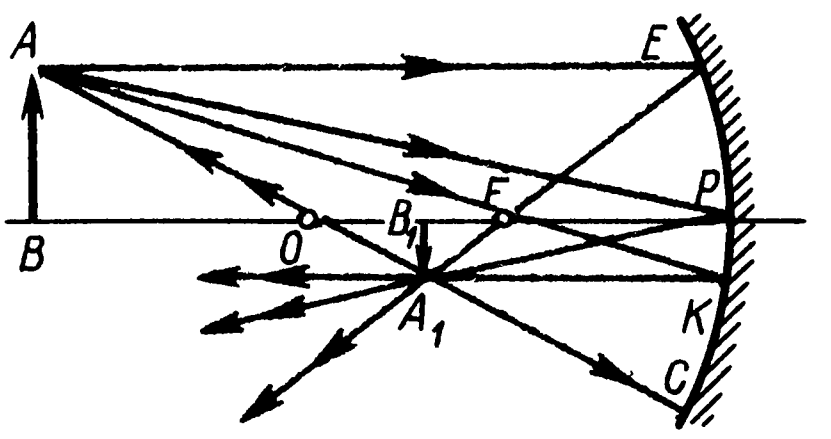


Рис. 148

Для построения изображения какой-либо точки A предмета наиболее удобные следующие лучи (рис. 148):

1) луч AOC, проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч COA идет по той же прямой;

2) луч AFK, идущий через фокус зеркала; отраженный луч параллелен главной оптической оси;

3) луч AP, падающий на зеркало в его полюсе; отраженный луч симметричен с падающим относительно главной оптической оси;

4) луч AE, параллельный главной оптической оси; отраженный луч EFA_1 проходит через фокус зеркала.

Как видно из рисунка, все отраженные лучи проходят через точку A_1, которая является изображением точки A. Для построения точки A_1 достаточно взять любые два из перечисленных лучей. Все остальные лучи, падающие на зеркало, после отражения также пойдут через точку A_1. При этом некоторых лучей может и не быть. Например, вогнутое зеркало, используемое врачами, имеет в середине отверстие. Поэтому лучей, отраженных от середины зеркала, не будет. Изображение создается в этом случае лучами, отраженными от имеющейся поверхности зеркала.

Чтобы построить изображение предмета, достаточно построить изображения крайних точек этого предмета.

?

1. Сформулируйте закон отражения света.
2. Что называют главным фокусом сферического зеркала?
3. Какие лучи удобно применять для построения изображения в сферическом зеркале?

УПРАЖНЕНИЕ 7

1. Пучок параллельных лучей идет из проекционного фонаря в горизонтальном направлении. Под каким углом к горизонтальной плоскости следует расположить плоское зеркало, чтобы после отражения пучок шел вертикально? Останется ли пучок параллельным?
2. На одном берегу небольшого водоема стоит столб с фонарем наверху, на другом находится человек. Как найти построением точку, в которой отражается от поверхности воды луч фонаря, попадающий в глаз человека? Вычислить расстояние искомой точки от столба, если его высота равна H, высота человека h и расстояние между столбом и человеком l.
3. Луч от точечного источника S падает на плоское зеркало в точке A и, отражаясь, проходит через точку B (рис. 149). Доказать, что если бы луч от того же источника прошел через точку B, отразившись от зеркала в точке D, соседней с A, то:
1) не был бы выполнен закон отражения;
2) путь SDB был бы пройден светом за большее время, чем путь SAB.
4. Какой высоты должно быть плоское зеркало, повешенное вертикально, чтобы человек высотой H видел себя в нем во весь рост? На какой высоте должны располагаться нижний и верхний края зеркала?
5. Почему нельзя использовать плоское зеркало в качестве киноэкрана?
6. Передвижное металлическое зеркальце (рефлектор) в карманном электрическом фонарике служит для регулировки пучка света. Как нужно расположить зеркальце по отношению к лампочке, чтобы пучок света был параллельным? расходящимся? сходящимся? Сделать чертежи хода лучей.
7. С помощью сферического зеркала на экране получено действительное уменьшенное изображение горящей свечи. Как изменится изображение, если покрыть черной краской нижнюю половину зеркала, включая полюс?
8. Где нужно поместить предмет, чтобы действительное изображение, даваемое сферическим зеркалом, по размеру равнялось предмету?
9. На рисунке 150 указаны положения главной оптической оси MN сферического зеркала, светящейся точки S и ее изображения S_1. Найти построением положения оптического центра зеркала, его полюса и фокуса. Определить, вогнутым или выпуклым является данное зеркало. Будет ли изображение действительным или мнимым?

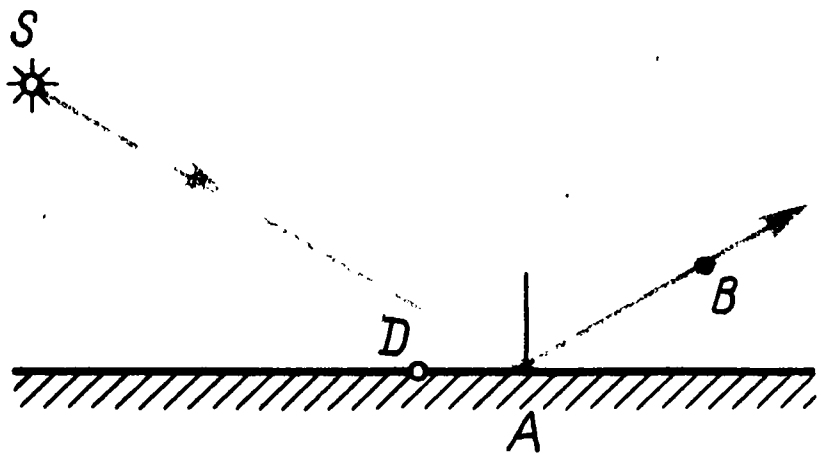


Рис. 149

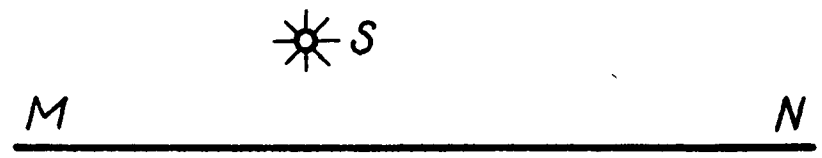


Рис. 150

§ 72. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

На границе двух сред свет меняет направление своего распространения. Часть световой энергии возвращается в первую среду, т. е. происходит *отражение света.* Если вторая среда прозрачна, то часть света при определенных условиях может пройти через границу сред, также меняя при этом, как правило, направление распространения. Это явление называется *преломлением света.*

Рис. 151

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение размеров, формы и расположения предметов. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого стакана монету или другой небольшой предмет. Подвинем стакан так, чтобы центр монеты, край стакана и глаз находились на одной прямой. Не меняя положения головы, нальем в стакан воду. По мере повышения уровня воды дно стакана с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь будет видна полностью.

Рис. 152

В этом же стакане с водой установим наклонно карандаш. При наблюдении сверху карандаш кажется надломленным у поверхности воды. Конец карандаша, находящийся в воде, кажется приподнятым (рис. 151). Рассматривая стакан сбоку, замечаем, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону и увеличенной в диаметре (рис. 152).

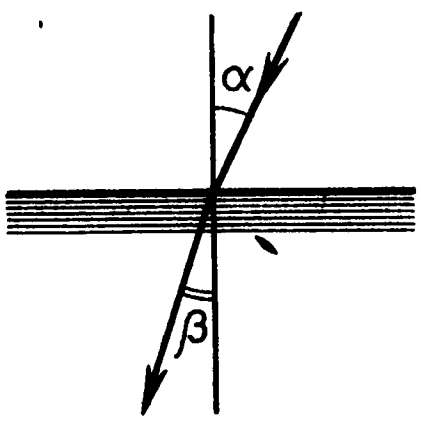


Рис. 153

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред. Луч, распространяющийся в первой среде и достигающий границы, называется *падающим лучом.* Он составляет с перпендикуляром к границе, проведенным через точку падения, угол α, называемый, как нам уже известно, *углом падения.* Луч, прошедший во вторую среду, называют *преломленным лучом.* Угол β, который этот луч образует с тем же перпендикуляром, называют *углом преломления* (рис. 153).

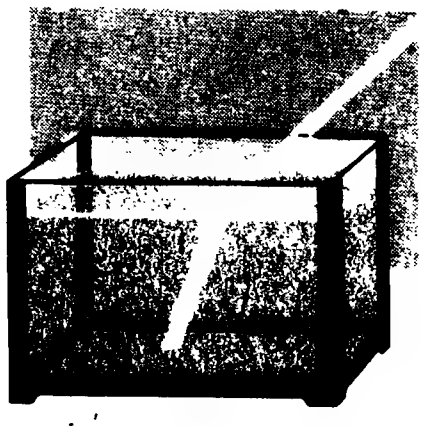


Рис. 154

Взаимное расположение падающего, отраженного и преломленного лучей нетруд-

но установить, сделав узкий световой пучок видимым. Ход такого пучка в воздухе можно проследить, если пустить в воздух немного дыма или же поставить экран под небольшим углом к лучу. Преломленный пучок виден в подкрашенной флюоресцеином воде аквариума (рис. 154).

Наблюдения показывают, что с увеличением угла падения растет и угол преломления. Однако зависимость не является прямо пропорциональной.

Закон преломления, установленный экспериментально в XVII веке, формулируется следующим образом: **падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восставленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух данных сред.**

Если α — угол падения, β — угол преломления, то

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n. \qquad (6.8)$$

Постоянная величина n называется *относительным показателем преломления* или *показателем преломления второй среды относительно первой.*

Показатель преломления среды относительно вакуума называют *абсолютным показателем преломления* этой среды. Он равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду. Относительный показатель преломления n связан с абсолютными показателями n_2 второй среды и n_1 первой среды соотношением

$$n = \frac{n_2}{n_1}, \qquad (6.9)$$

которое будет доказано в VII главе. Поэтому закон преломления может быть записан следующим образом:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (6.10)$$

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть *оптически менее плотной средой.*

Абсолютный показатель преломления среды имеет глубокий физический смысл. Он связан со скоростью распространения света в данной среде и зависит от физического состояния среды, в которой распространяется свет, т. е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нем упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от характеристик самого света. Для красного света он меньше, чем для зеленого, а для зеленого меньше, чем для фиолетового.

Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение n и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от указанных факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу *воздух — твердое тело* или *воздух — жидкость,* а не через границу *вакуум — среда.* Однако абсолютный показатель преломления n_2 твердого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха очень незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для желтого света равен приблизительно 1,000292. Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2.$$

Значения показателей преломления для некоторых веществ относительно воздуха приведены в таблице (данные относятся к желтым лучам).

Вещество	Показатель преломления относительно воздуха
Вода (при 20 °С)	1,33
Кедровое масло (при 20 °С)	1,52
Сероуглерод (при 20 °С)	1,63
Лед	1,31
Каменная соль	1,54
Кварц	1,54
Рубин	1,76
Алмаз	2,42
Различные сорта стекла	от 1,47 до 2,04

Убедиться в справедливости закона преломления можно с помощью прозрачного полуцилиндра с матовой задней поверхностью. Для этого полуцилиндр закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности совпадала с центром диска (рис. 155). Свет идет вдоль радиуса диска и преломляется на плоской поверхности полуцилиндра. Ход луча в стекле виден на матовой стенке. Перемещая осветитель, меняют угол падения. Углы падения измеряют по шкале на диске. Так же измеряют и углы преломления. Пользуясь тригонометрическими таблицами, нетрудно убедиться в том, что отношение синуса угла падения к синусу угла преломления остается неизменным при изменении угла падения. Причем легко заметить, что угол преломления меньше угла падения. Покажем это, представив закон преломления (6.8) так:

$$\sin\beta = \frac{1}{n}\sin\alpha. \qquad (6.11)$$

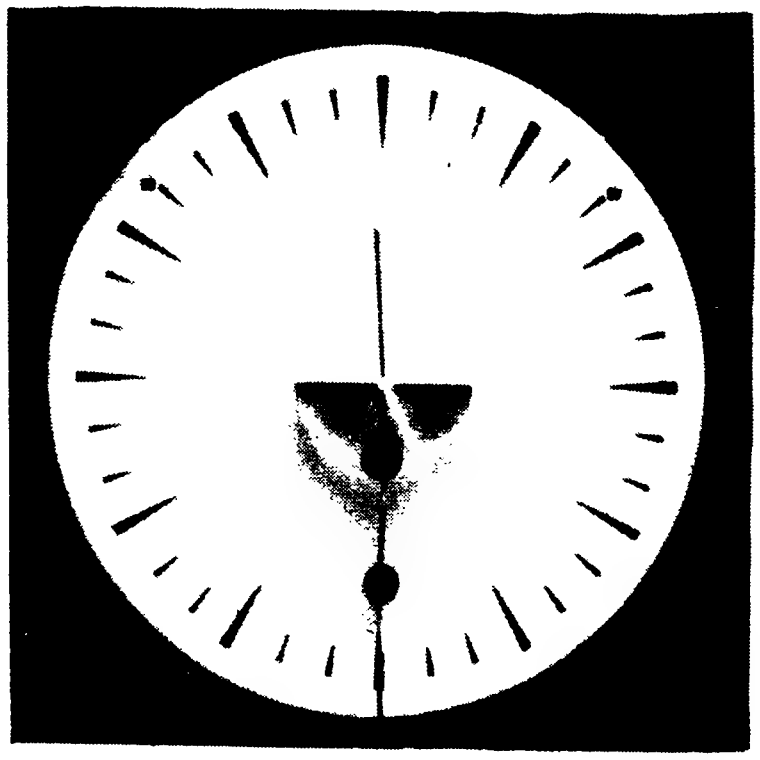


Рис. 155

Для стекла (или воды) $n > 1$; поэтому $\frac{1}{n} < 1$, и $\sin\beta < \sin\alpha$. Следовательно, $\beta < \alpha$. Это значит, что, попадая в среду, оптически более плотную, луч отклоняется в сторону перпендикуляра к границе двух сред. И только, если луч идет вдоль перпендикуляра к границе раздела ($\alpha = 0$), он проходит во вторую среду, не преломляясь ($\beta = 0$).

В таких опытах можно обнаружить, что преломленный пучок не несет с собой всей световой энергии, которую несет падающий пучок. Часть света отражается от поверхности и возвращается в первую среду (воздух). Будем менять угол падения от 0 (нормальное падение) до 90° (скользящий луч). В соответствии с законом отражения угол отражения также изменяется от 0 до 90°. Внимательно наблюдая, можно заметить, что с увеличением угла падения интенсивность отраженного света растет. Пучок, близкий к скользящему, отражается от воды и от стекла почти полностью.

§ 73. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ

Вернемся снова к опытам, в которых мы наблюдали преломление света на границе воздух — вода или воздух — стекло. Только теперь исследуем явления, наблюдаемые при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную. Для этого в опытах со стеклянным полуцилиндром поместим осветитель в нижней части диска. Если падающий луч пустить вдоль того радиуса, по которому шел ранее преломленный луч, то можно увидеть, что по выходе из стекла луч пойдет по линии бывшего падающего луча. Падающий и преломленный лучи обратимы.

Кроме падающего луча, в стекле существует и отраженный луч. Его след можно заметить на матовой поверхности полуцилиндра (рис. 156). Отражение происходит в соответствии с законом отражения: угол отражения равен углу падения. Если n — показатель преломления стекла относительно воздуха ($n > 1$), то показатель преломления воздуха относительно стекла

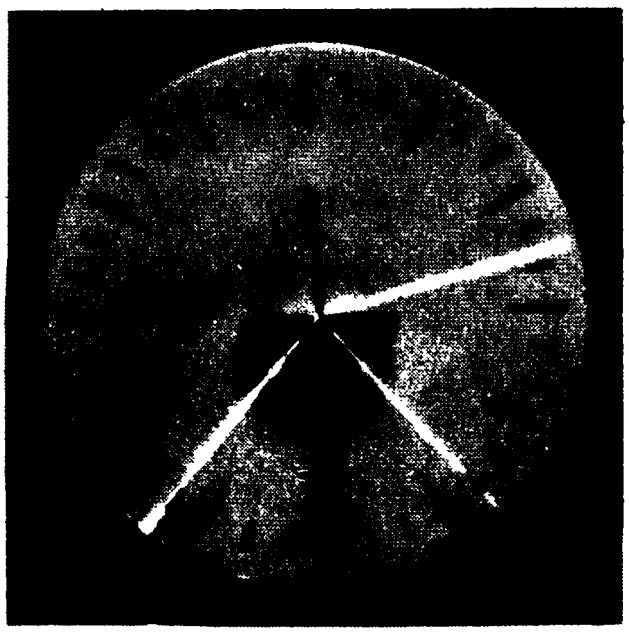


Рис. 156

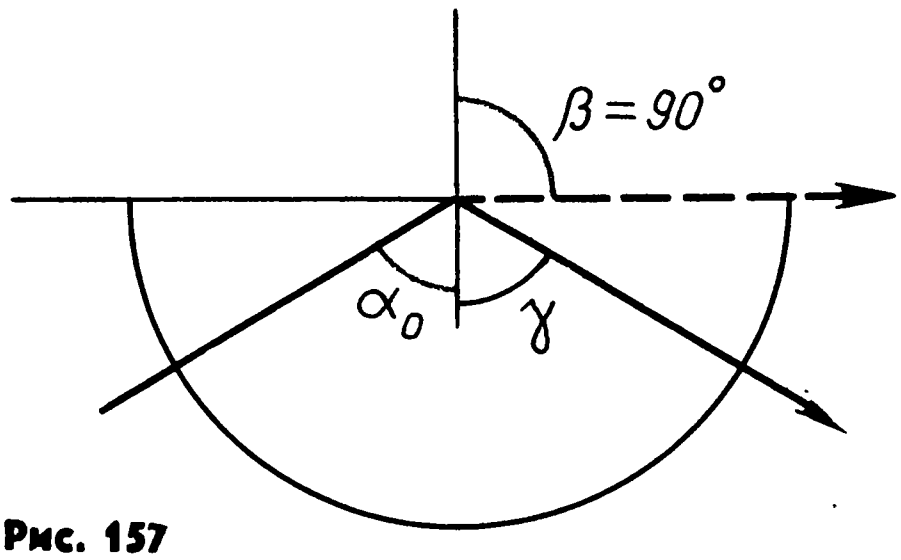


Рис. 157

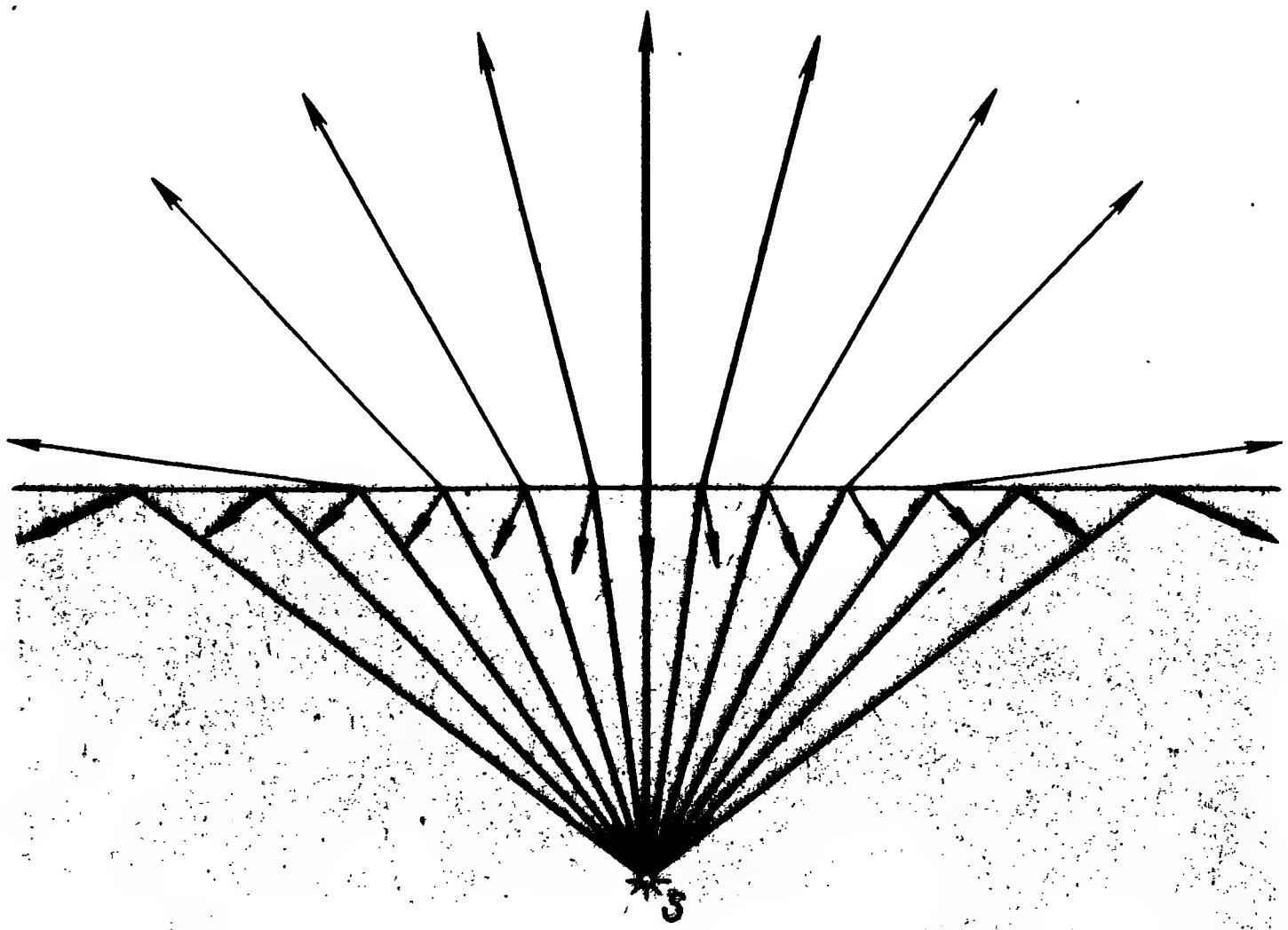


Рис. 158

будет равен $\frac{1}{n}$. В данном случае стекло является первой средой, а воздух — второй. Закон преломления запишется так:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{1}{n}. \qquad (6.12)$$

Перемещая осветитель, будем увеличивать угол падения. Одновременно будут увеличиваться угол отражения, равный углу падения, и угол преломления. При этом угол преломления больше угла падения. Действительно, из формулы (6.12) имеем: $\sin\beta = n\sin\alpha$. Так как в данном случае $n>1$, то $\sin\beta>\sin\alpha$ и, следовательно, угол преломления больше угла падения ($\beta>\alpha$). Значит, переходя в оптически менее плотную среду, луч отклоняется в сторону от перпендикуляра к границе двух сред.

Внимательно наблюдая, можно заметить, что с увеличением угла падения яркость, а значит, и энергия отраженного пучка растет, в то время как яркость (энергия) преломленного пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломленного пучка, когда угол преломления приближается к 90°. Наконец, когда угол падения становится таким, что преломленный пучок идет почти вдоль границы раздела (рис. 157), доля отраженной энергии близка к 100%. Наибольшему возможному углу преломления $\beta=90°$ соответствует угол падения α_0. Повернем осветитель, сделав угол падения α большим α_0. Мы увидим, что преломленный пучок исчез и весь свет отражается от границы раздела, т. е. происходит *полное отражение света.*

Полное отражение света происходит от границы оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой, когда

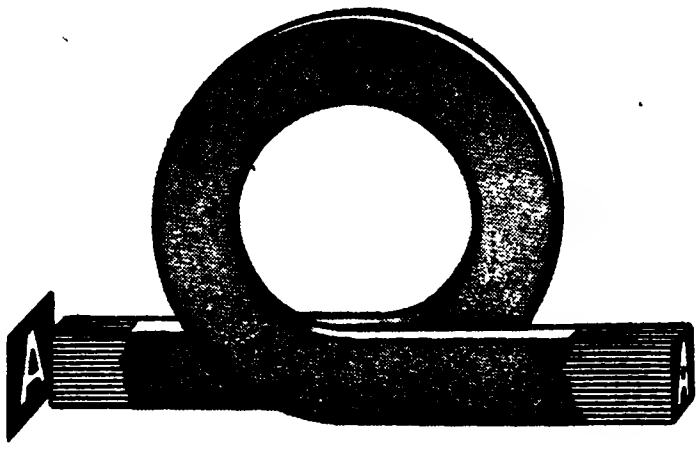


Рис. 159

угол падения α больше или равен α_0. Угол падения α_0, соответствующий углу преломления 90°, называют поэтому *предельным углом полного отражения.* При $\sin\beta=1$ формула (6.12) принимает вид:

$$\sin\alpha_0=\frac{1}{n}. \qquad (6.13)$$

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения α_0. Для воды ($n=1{,}33$) он оказывается равным 48°35′, для стекла ($n=1{,}5$) — 41°50′, для алмаза ($n=2{,}4$) — 24°40′. Во всех случаях второй средой является воздух.

На рисунке 158 изображен пучок лучей от источника, помещенного в воде недалеко от поверхности. Бóльшая интенсивность света показана большей толщиной линии, изображающей соответствующий луч.

Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Нальем в стакан воду и поднимем его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды при рассматривании ее снизу сквозь стенку кажется блестящей, словно посеребренной, вследствие полного отражения света.

Полное отражение используют в так называемой волоконной оптике для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — световодам. Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления. За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому (прямому или изогнутому) пути. Волокна набираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передается какой-нибудь элемент изображения (рис. 159). Жгуты из волокон используются, например, в медицине для исследования внутренних органов (введение обычной лампочки вызывает нежелательное нагревание).

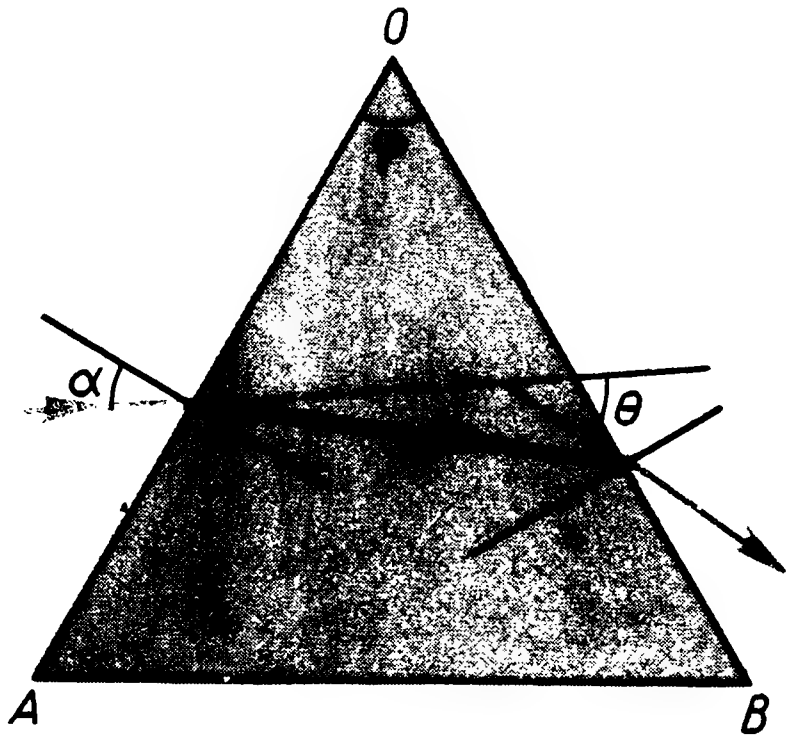


Рис. 160

§ 74. ХОД ЛУЧЕЙ В ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЕ

В оптических приборах часто используется треугольная призма, изготовленная из стекла или других прозрачных материалов. Такая призма является важнейшей деталью приборов для исследования цветового состава света. Она применяется также в биноклях, перископах и многих других устройствах.

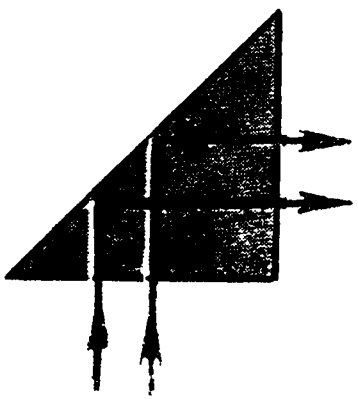


Рис. 161

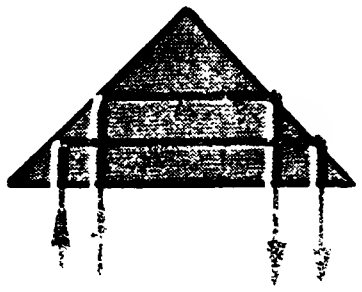


Рис. 162

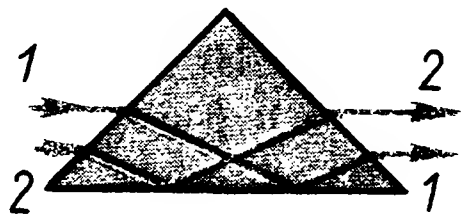


Рис. 163

На рисунке 160 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной ее боковым ребрам. Луч в призме преломляется дважды: на грани OA и на грани OB. Угол φ между этими гранями называют *преломляющим углом призмы.* Угол θ отклонения луча зависит от преломляющего угла призмы φ, от показателя преломления n материала призмы и от угла падения α.

В оптических приборах часто применяется стеклянная призма, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник. Ее применение основано на том, что предельный угол полного отражения для стекла меньше 45° Поэтому в случаях, изображенных на рисунках 161, 162, 163, происходит полное отражение. Призма на рисунке 161 поворачивает пучок на 90°, что необходимо, например, в перископе. Другой случай хода лучей, изображенный на рисунке 162, имеет место в призматических биноклях: направление пучка света изменяется на 180°. Рисунок 163 показывает применение призмы для изменения порядка следования лучей, идущих из какого-либо оптического прибора. Верхние лучи становятся нижними, и наоборот.

УПРАЖНЕНИЕ 8

1. Вычислить показатель преломления воды относительно алмаза и сероуглерода относительно льда.

2. Угол падения параллельных лучей на плоскопараллельную пластину $\alpha = 60°$. Найти расстояние x между точками, в которых выходят из пластины параллельные лучи, если расстояние между лучами, прошедшими сквозь пластину, $l = 0{,}7$ см.

3. Если рассматривать какой-либо предмет через треугольную призму, то изображение кажется смещенным. В какую сторону?

4. Стеклянная призма, в основании которой лежит равнобедренный прямоугольный треугольник, погружена в воду. Можно ли использовать ее в воде так, как показано на рисунках 161 и 162?

5. Стеклянная призма, о которой шла речь в предыдущей задаче, лежит короткой гранью на столе, покрытом газетой. Виден ли текст через другую короткую грань? через длинную?

6. Луч света, идущий из толщи воды, претерпевает полное отражение на ее поверхности. Выйдет ли луч в воздух, если на поверхность воды налить слой кедрового масла?

7. Сечение призмы представляет собой равносторонний треугольник. Луч света проходит призму, преломляясь в точках, равноотстоящих от вершины. Каково наибольшее допустимое значение показателя преломления n вещества призмы?

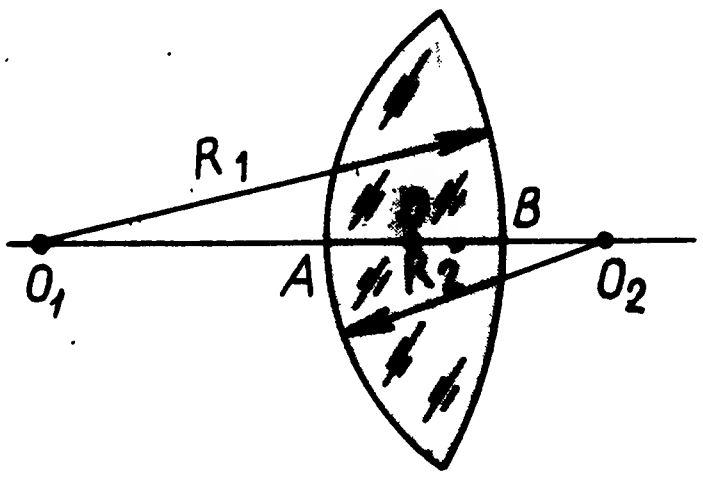


Рис. 164

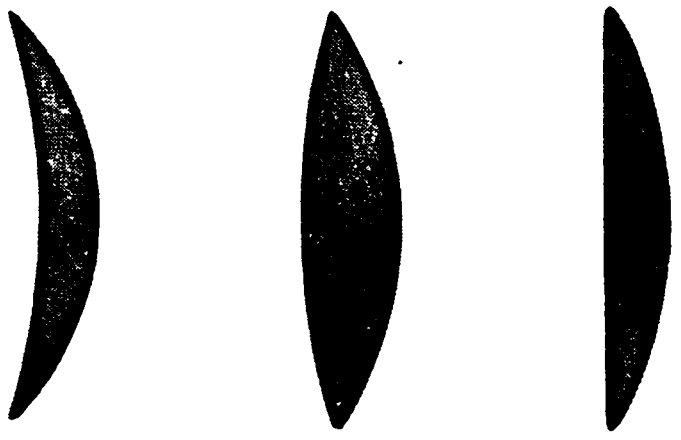


Рис. 165

§ 75. ЛИНЗА

До сих пор мы рассматривали преломление света на плоской границе двух сред. На практике широко используется преломление на сферических поверхностях. Такие поверхности наиболее просты в изготовлении.

Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, называют линзой [1].

Обычно линзы делают из стекла. Прямую O_1O_2, проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют ее *главной оптической осью* (рис. 164).

Линзы, у которых середина толще, чем края (рис. 165), называются *собирающими*. Любую из них схематично можно себе представить как совокупность стеклянных призм (рис. 166). В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Все лучи, идущие через линзу, отклоняются в сторону ее главной оптической оси. Наоборот, стеклянные линзы, изображенные на рисунке 167, являются *рассеивающими*. Толщина каждой из них в середине меньше, чем по краям. Это приводит к отклонению лучей в воздухе в сторону от главной оптической оси, т. е. к их «рассеиванию».

Тонкая линза. Мы будем рассматривать наиболее простой случай, когда толщина линзы $l = |AB|$ (см. рис. 164) пренебрежимо мала по сравнению с радиусами R_1 и R_2 кривизны поверхностей и расстоянием предмета от линзы. Такую линзу называют *тонкой линзой*. В дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем подразумевать тонкую линзу.

Точки A и B — вершины сферических сегментов — в тонкой линзе расположены столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку, которую называют *оптическим центром линзы* и обозначают буквой O.

Главная оптическая ось тонкой линзы проходит через оптический центр. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют *побочной оптической осью*.

---

[1] Одна из поверхностей может быть плоской. Плоскую поверхность можно рассматривать как сферическую с бесконечно большим радиусом кривизны.

Рис. 166

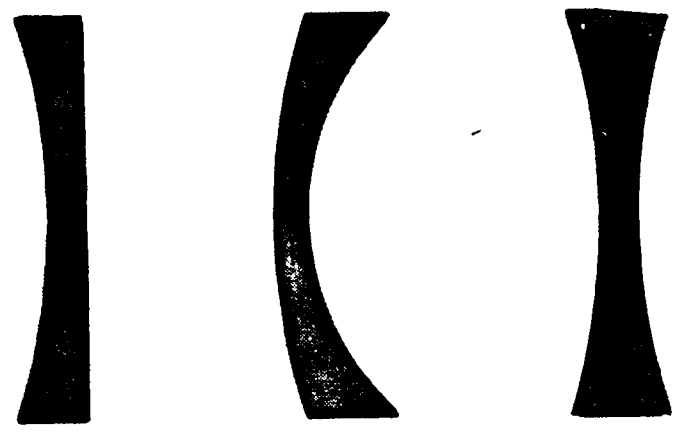


Рис. 167

Изображение в линзе. Подобно плоским и сферическим зеркалам линза создает изображения источников света. Это означает, что свет, исходящий из какой-либо точки предмета (источника), после преломления в линзе снова собирается в одну точку (изображение) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если по выходе из линзы лучи сходятся, они образуют действительное изображение. В случае же, когда прошедшие через линзу лучи являются расходящимися, пересекаются в одной точке не сами эти лучи, а лишь их продолжения. Изображение тогда является мнимым. Его можно наблюдать глазом непосредственно или с помощью оптических приборов [1].

Собирающая линза. Преломление лучей в собирающей линзе можно наблюдать на опыте. Линзу устанавливают горизонтально в центре диска. Сначала направляют луч вертикально вдоль главной оптической оси и убеждаются в том, что он проходит через линзу без преломления (рис. 168). Затем пускают луч вдоль побочной оси и наблюдают лишь небольшой параллельный сдвиг преломленного луча (рис. 169).

После этого направляют от осветителя на линзу три параллельных луча вертикально. Преломившись, они после выхода из линзы пересекаются в одной точке (рис. 170).

---

[1] Лучи или их продолжения будут пересекаться практически в одной точке, если они образуют малые углы с главной оптической осью.

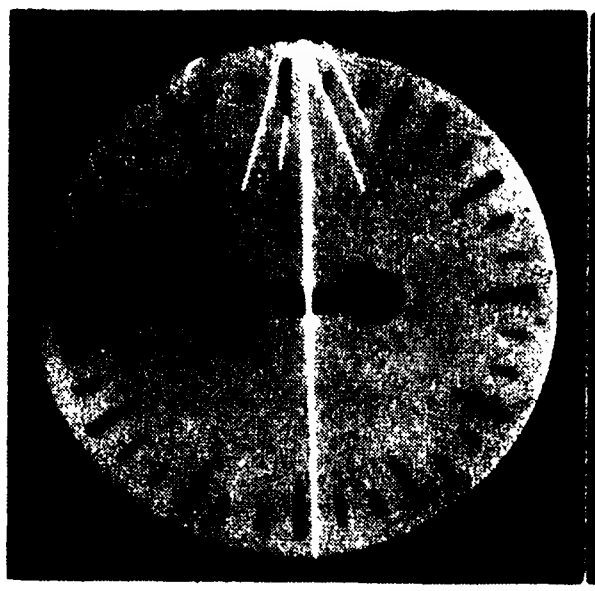


Рис. 168

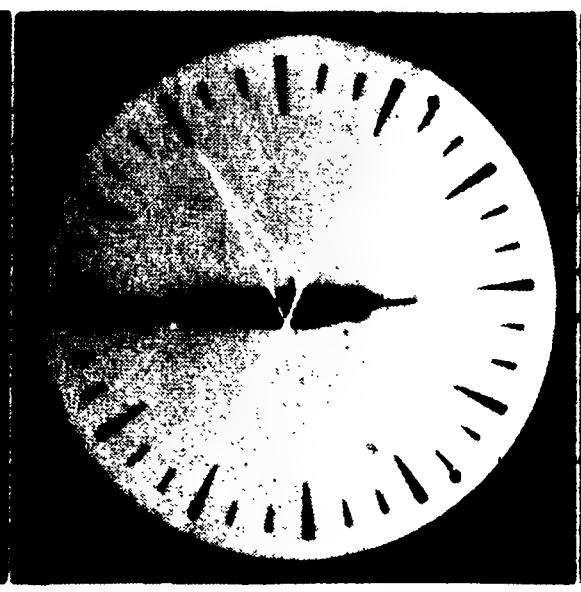


Рис. 169

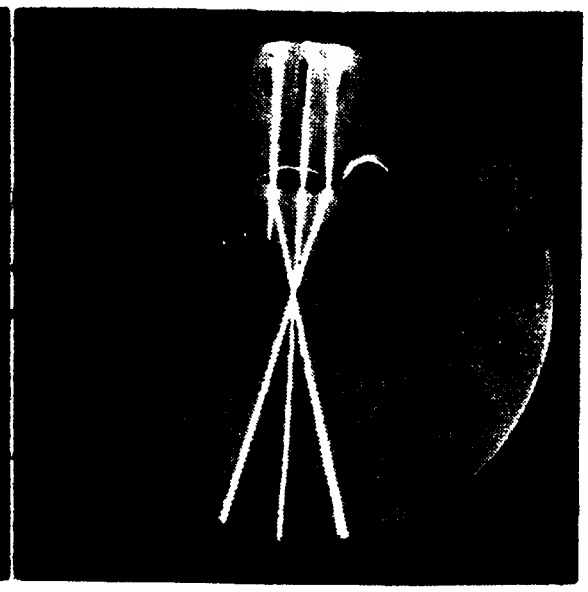


Рис. 170

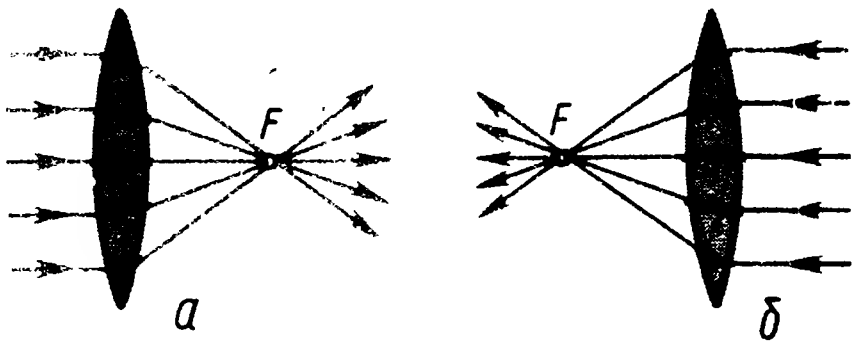


Рис. 171

Точка, в которой пересекаются после преломлений в собирающей линзе лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, называется главным фокусом линзы. Эту точку обозначают буквой F (рис. 171, *а*).

Лучи, параллельные главной оптической оси, можно направить на линзу и с противоположной стороны. Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, будет другим главным фокусом (рис. 171, *б*). В отличие от сферического зеркала главных фокусов у линзы два. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одном и том же расстоянии от нее. Это расстояние называется *фокусным расстоянием линзы*; его обозначают обычно буквой F (той же буквой, что и фокусы).

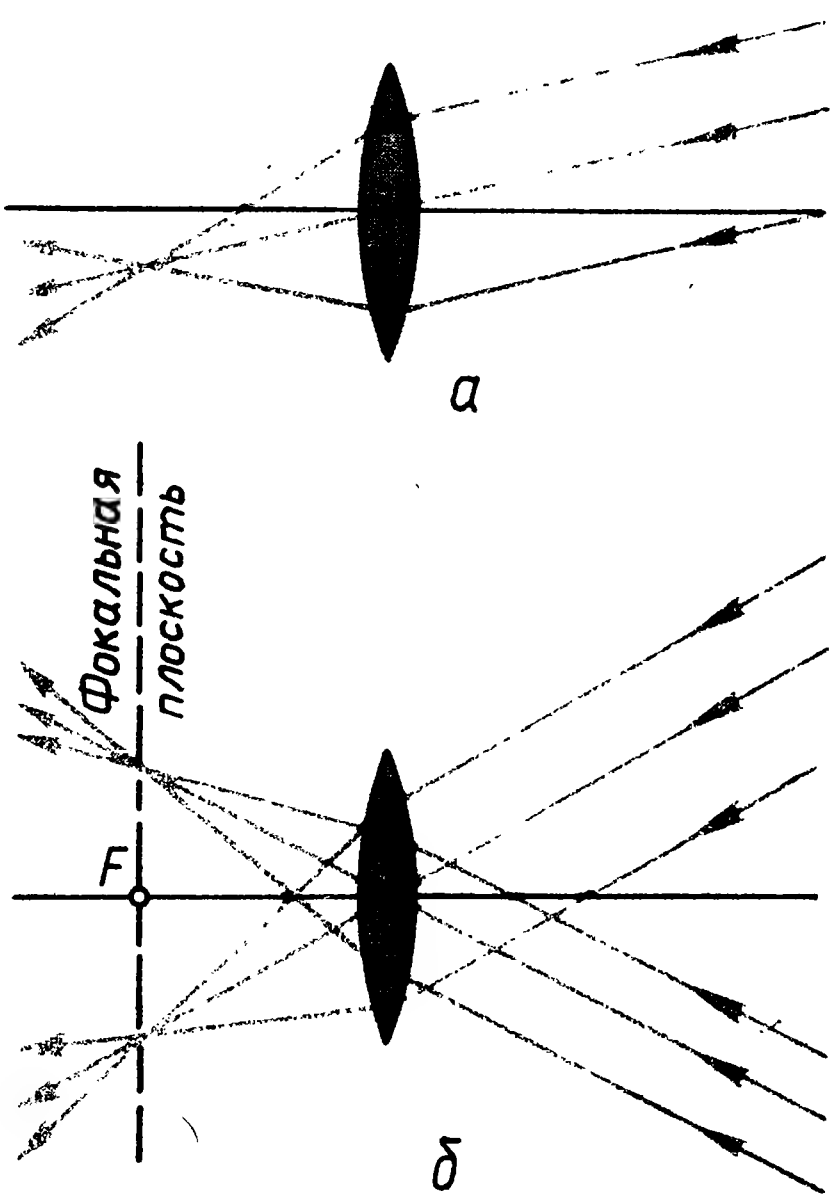


Рис. 172

Пустим три параллельных луча осветителя под углом к главной оптической оси. Мы увидим тогда, что пересечение произойдет не в главном фокусе, а в другой точке (рис. 172, *а*). Но примечательно то, что точки пересечения лучей, падавших на линзу параллельными пучками, и при различных углах, образуемых этими пучками с главной оптической осью, располагаются в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус (рис. 172, *б*). Ее называют *фокальной плоскостью*. Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в любой точке фокальной плоскости), получаем после преломления параллельные лучи (рис. 173).

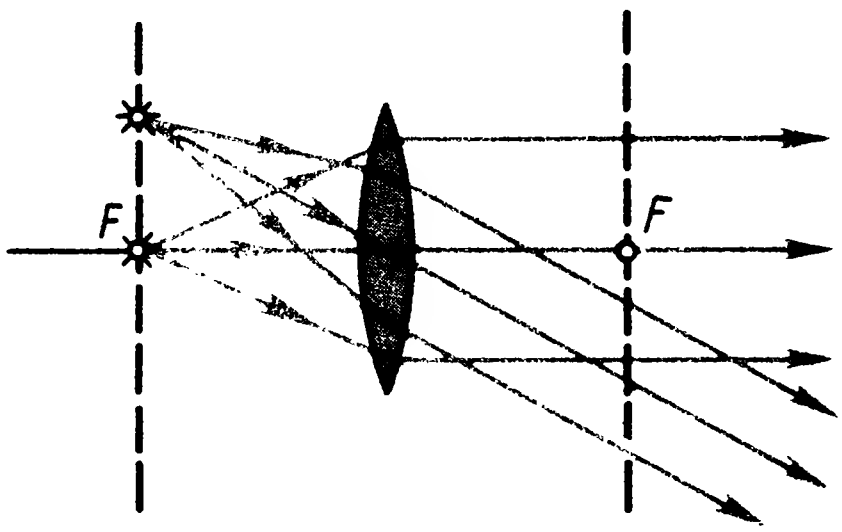


Рис. 173

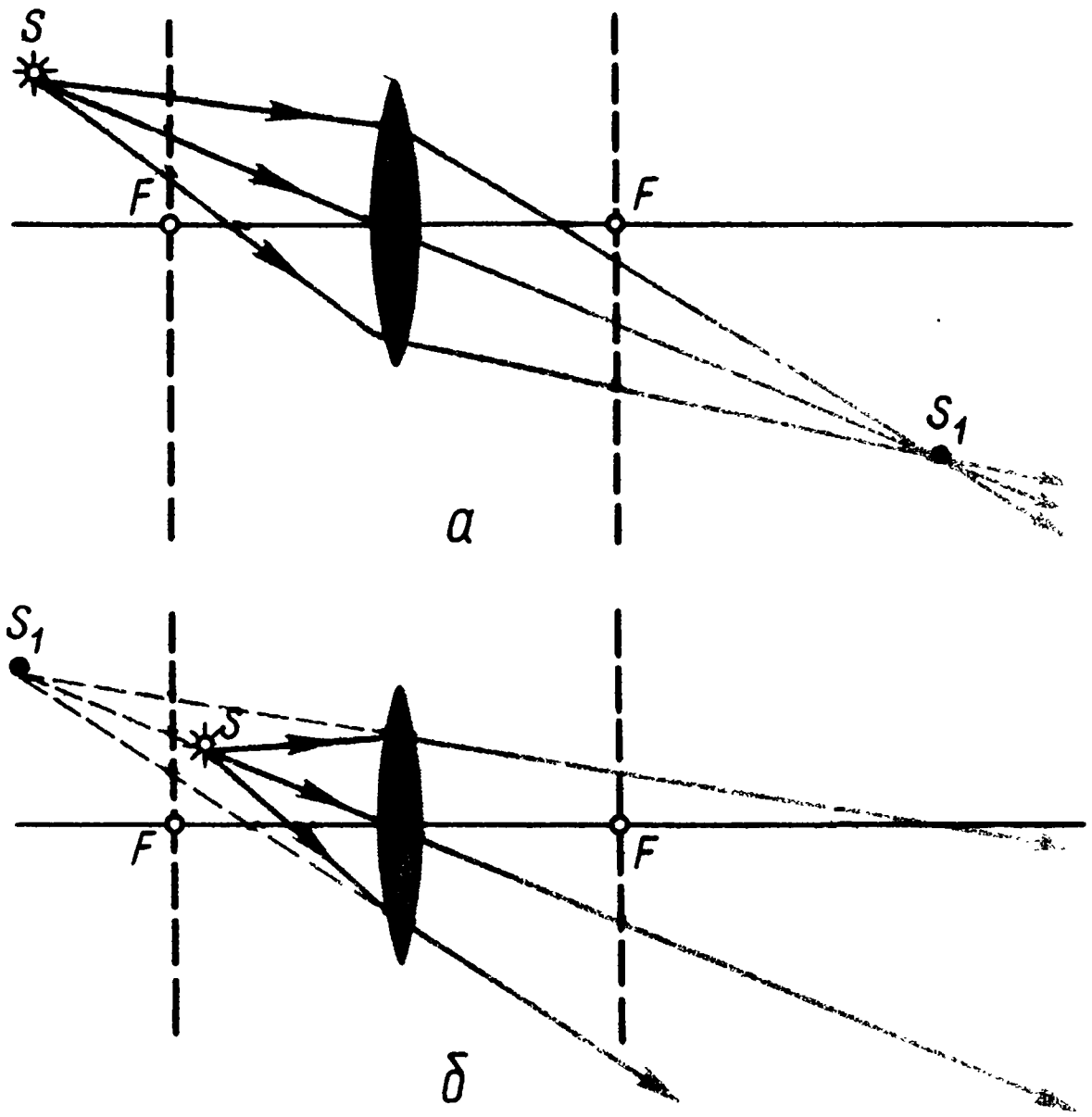


Рис. 174

Если сместить источник дальше от линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение (рис. 174, *а*). Когда же источник находится ближе фокуса, преломленные лучи расходятся и изображение получается мнимым (рис. 174, *б*).

Рассеивающая линза. Такие же опыты можно провести с рассеивающей линзой. Укрепив линзу в центре диска, направляем на нее лучи, параллельные главной оптической оси. Преломленные лучи будут расходящимися (рис. 175), а их продолжения пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы. Он является мнимым (рис. 176, *а*) и расположен на расстоянии F от

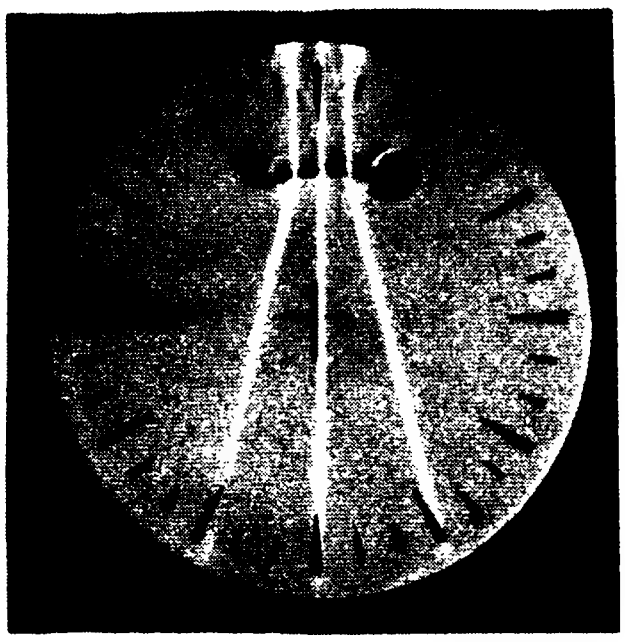


Рис. 175

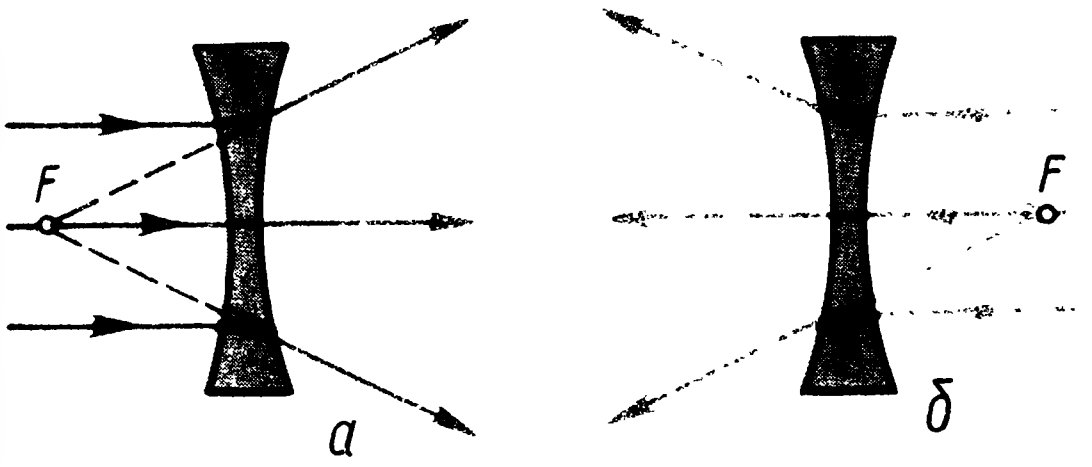


Рис. 176

линзы. Второй мнимый главный фокус находится по другую сторону линзы на том же расстоянии, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 176, *б*).

Оптическая сила линзы. Величину, обратную фокусному расстоянию, называют оптической силой линзы. Ее обозначают буквой D:

$$D = \frac{1}{F}. \qquad (6.14)$$

Чем ближе к линзе лежат ее фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше по абсолютному значению оптическая сила линзы.

Оптическую силу D линз выражают в диоптриях (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м.

§ 76. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЛИНЗЕ

Свойства тонкой линзы определяются, главным образом, расположением ее фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника до линзы и фокусное расстояние (положение фокусов), можно определить расстояние до изображения, не прибегая к рассмотрению хода лучей внутри линзы. В связи с этим отпадает надобность изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Собирающую линзу представляют символом, показанным на рисунке 177, а рассеивающую — символом, показанным на рисунке 178.

Нам уже известно, что все лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета, пройдя сквозь линзу, пересекаются также в одной точке. Именно благодаря этому свойству тонкая линза дает изображение любой точки предмета, а следовательно, и всего предмета в целом.

Для построения изображений, получаемых с помощью собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой заданы, мы преимущественно будем пользоваться тремя видами «удобных» лучей. Как было выяснено в предыдущем параграфе, лучи, параллельные главной оптической оси, преломившись в линзе, проходят через ее фокус. Из обратимости хода лучей следует, что лучи, идущие к линзе через ее фокус, после преломления пойдут параллельно главной оптической оси. Наконец, лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления. Они лишь испытывают параллельное смещение, которое в случае тонкой линзы невелико, и им можно пренебречь.

Построим изображение предмета AB (рис. 179). Чтобы найти изображение точки A, направим луч AC параллельно главной оптической оси. После преломления он пойдет через фокус линзы. Другой луч — AD можно направить через фокус. После преломления он пойдет параллельно главной оптической оси. В точ-

ке пересечения этих двух преломленных лучей будет находиться изображение A_1 точки A. Так же можно построить и все остальные точки изображения. Не следует только думать, что изображение создается двумя или тремя лучами; оно создается всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки A и собравшихся в точке A_1. В частности, в точку A_1 попадает луч AOA_1, прошедший через оптический центр O линзы. Таким образом, для построения изображения точки можно использовать любые два из трех «удобных» лучей, ход которых через линзу известен: 1) луч, проходящий через оптический центр; 2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси, и 3) луч, проходящий через фокус.

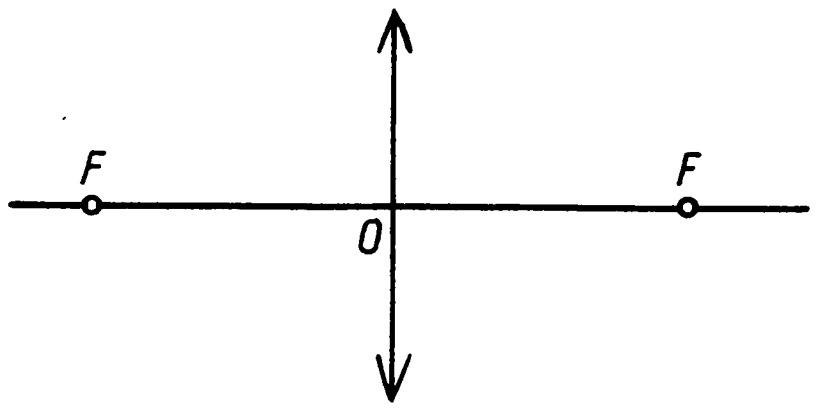


Рис. 177

Рассмотрим еще случай, когда необходимо построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность заключается в том, что все три «удобных» луча сливаются в один, совпадающий с главной оптической осью. Поэтому возникает необходимость определить ход произвольного луча SB (рис. 180), попавшего на линзу в точке B. Для построения преломленного луча проведем побочную оптическую ось PQ, параллельную лучу SB. Затем построим фокальную плоскость F и найдем точку C пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку пройдет преломленный луч BC. Таким образом, построен ход двух лучей, вы-

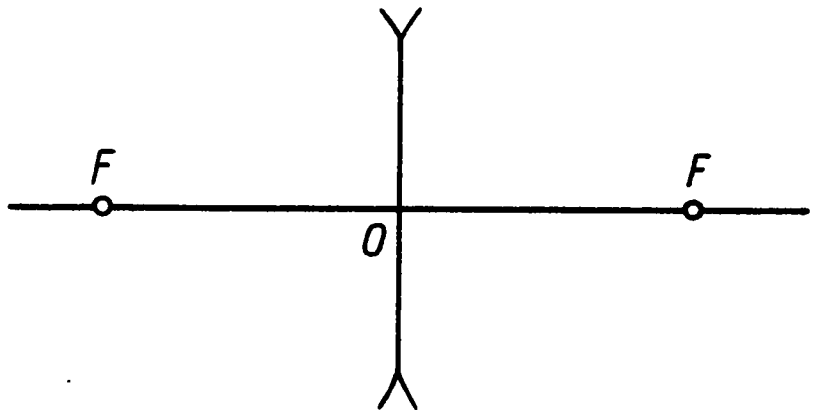


Рис. 178

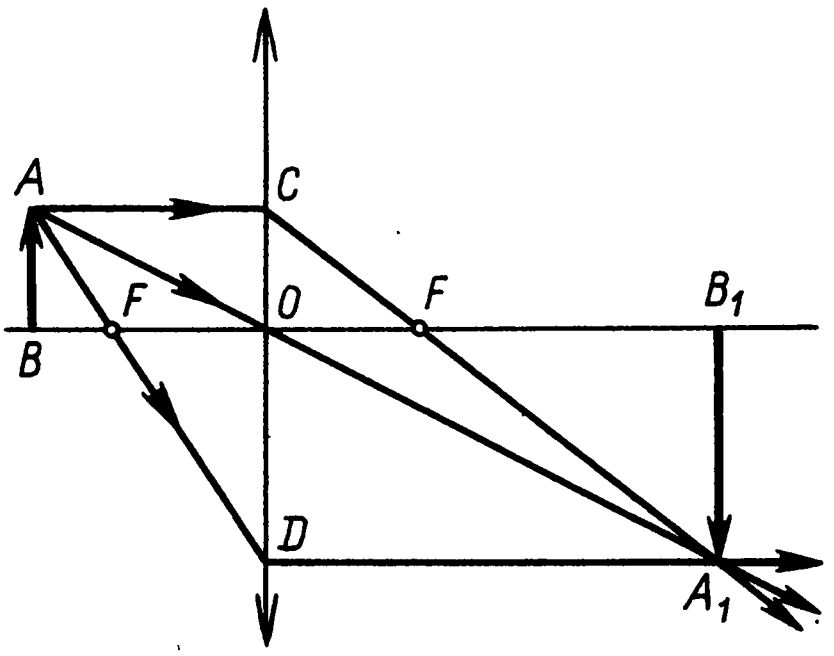


Рис. 179

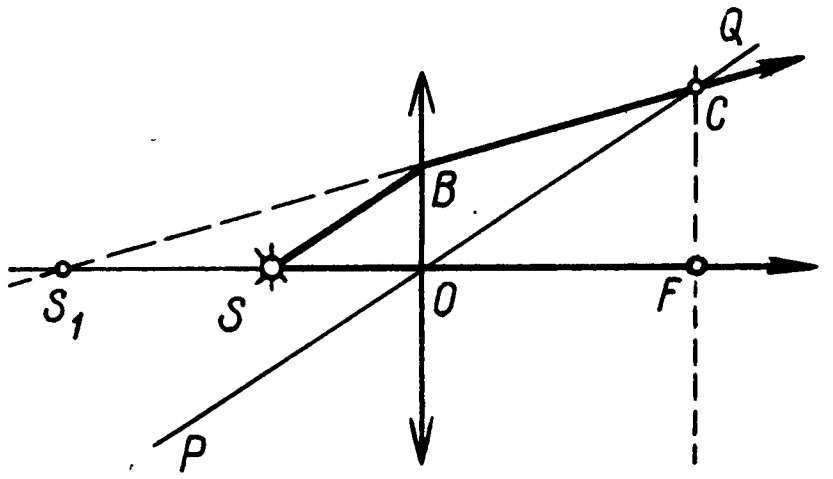


Рис. 180

ходящих из точки S. После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение S_1 точки S будет мнимым, так как источник расположен между фокусом и линзой.

§ 77. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

Выведем формулу, связывающую три величины: расстояние d от предмета до линзы, расстояние f от изображения до линзы и фокусное расстояние F.

Из подобия треугольников ABF и DOF (см. рис. 179) следует, что

$$\frac{|OD|}{|AB|} = \frac{|OF|}{|BF|}.$$

Так как $|OD| = |A_1B_1|$, то

$$\frac{|A_1B_1|}{|AB|} = \frac{|OF|}{|BF|} = \frac{F}{d-F}. \qquad (6.15)$$

Кроме того, из подобия треугольников COF и A_1B_1F следует, что

$$\frac{|A_1B_1|}{|OC|} = \frac{|B_1F|}{|OF|}.$$

Учитывая, что $|OC| = |AB|$, можно записать:

$$\frac{|A_1B_1|}{|AB|} = \frac{f-F}{F}. \qquad (6.16)$$

Теперь приравняем правые части равенств (6.15) и (6.16):

$$\frac{F}{d-F} = \frac{f-F}{F}.$$

Отсюда

$$F^2 = fd - fF - Fd + F^2,$$

или

$$fF + Fd = fd.$$

Поделив все члены полученного выражения на произведение Ffd, получим:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \qquad (6.17)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \qquad (6.18)$$

Соотношения (6.17) или (6.18) принято называть *формулой тонкой линзы*. Величины d, f и F могут быть как положительными, так и отрицательными. Отметим без доказательства, что, применяя формулу линзы, нужно ставить знаки перед членами по следующему правилу. Если линза собирающая, то ее фокус

действительный и перед членом $\frac{1}{|F|}$ ставится знак «плюс». В случае рассеивающей линзы $F < 0$ и в правой части формулы (6.17) будет стоять отрицательная величина $-\frac{1}{|F|}$. Перед членом $\frac{1}{|f|}$ ставится знак «плюс», если изображение действительное, и знак «минус» в случае мнимого изображения. Наконец, перед членом $\frac{1}{|d|}$ ставят знак «плюс» в случае действительной светящейся точки и «минус», если она мнимая (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

В том случае, когда F, f или d неизвестны, перед соответствующими членами $\frac{1}{F}$, $\frac{1}{f}$ или $\frac{1}{d}$ ставится знак «плюс». Но если в результате вычислений фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения или до источника получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник являются мнимыми.

Увеличение линзы. Изображение, даваемое линзой, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют *увеличением.*

Линейным увеличением называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для нахождения линейного увеличения обратимся снова к рисунку 179. Если высота предмета AB равна h, а высота изображения A_1B_1 равна H, то

$$\Gamma = \frac{H}{h}$$

есть линейное увеличение.

Из подобия треугольников OAB и OA_1B_1 вытекает, что

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|}.$$

Следовательно, увеличение линзы равно:

$$\Gamma = \frac{|f|}{|d|}. \qquad (6.19)$$

?
1. Сформулируйте закон преломления света.
2. Чем отличается абсолютный показатель преломления света от относительного?
3. Чему равен предельный угол полного отражения?
4. Какую линзу называют тонкой?
5. Что называют главным фокусом линзы?
6. Запишите формулу линзы.
7. Какие лучи удобно использовать для построения изображения в линзе?
8. Что называется увеличением линзы?

§ 78. ФОТОАППАРАТ. ПРОЕКЦИОННЫЙ АППАРАТ

На законах геометрической оптики основано устройство и действие разнообразных оптических приборов. В первую очередь рассмотрим те из них, в которых изображение получается действительным. Для фиксации и сохранения этого изображения используется химическое действие света.

Фотография была изобретена в 30-х годах XIX века и прошла долгий путь развития. Современная фотография, ставшая малоформатной, моментальной, цветной, стереоскопической, нашла широчайшее применение во всех областях жизни. Велика ее роль в исследовании природы. Фотография позволяет регистрировать различные объекты (от микроскопических до космических), невидимые излучения и т. д. Всем известно значение художественной фотографии, детищем которой является кино.

Фотоаппарат. Внешний вид одного из современных фотоаппаратов показан на рисунке 181. Основными частями фотоаппарата являются непрозрачная камера и система линз, называемая объективом. Простейший объектив представляет собой одну собирающую линзу. Объектив создает вблизи задней стенки камеры действительное перевернутое изображение фотографируемого предмета. В большинстве случаев предмет находится на расстоянии, большем двойного фокусного расстояния. Поэтому изображение получается уменьшенным. В том месте, где получается изображение, помещают фотопластинку или фотопленку, покрытую слоем светочувствительного вещества, так называемой фотоэмульсией.

Фотографируемый предмет может находиться на разных расстояниях от аппарата. В связи с этим расстояние между объективом и пленкой также нужно изменять. Это изменение осуществляют обычно перемещением объектива с помощью винтовой резьбы или путем растяжения и сжатия камеры (для этого ее стенки делают в виде «гармошки»).

Световая энергия, попадающая на светочувствительный слой, дозируется фотографическим затвором, который открывает доступ свету лишь на определенное время — время экспозиции. Оно зависит от чувствительности фотоэмульсии и от освещенности пленки. Легко понять, что пленка будет освещена тем лучше, чем больше размеры линз объектива и чем ближе к объективу находится светочувствительный слой. Диаметр действующей части объектива можно менять с помощью диафрагмы и этим регулировать освещенность фотопленки. Но диафрагма играет еще и другую роль.

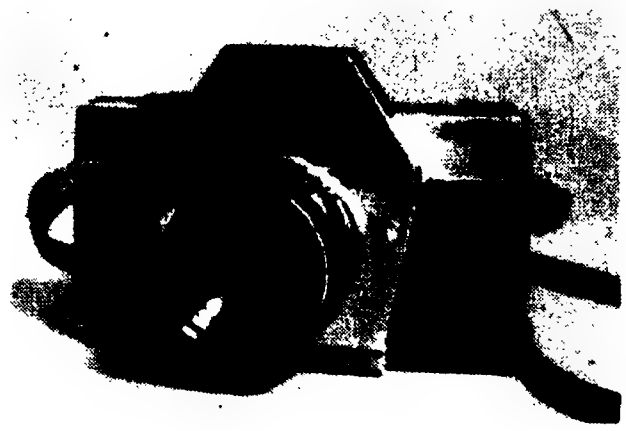


Рис. 181

Пусть мы фотографируем светящуюся точку A, расположенную

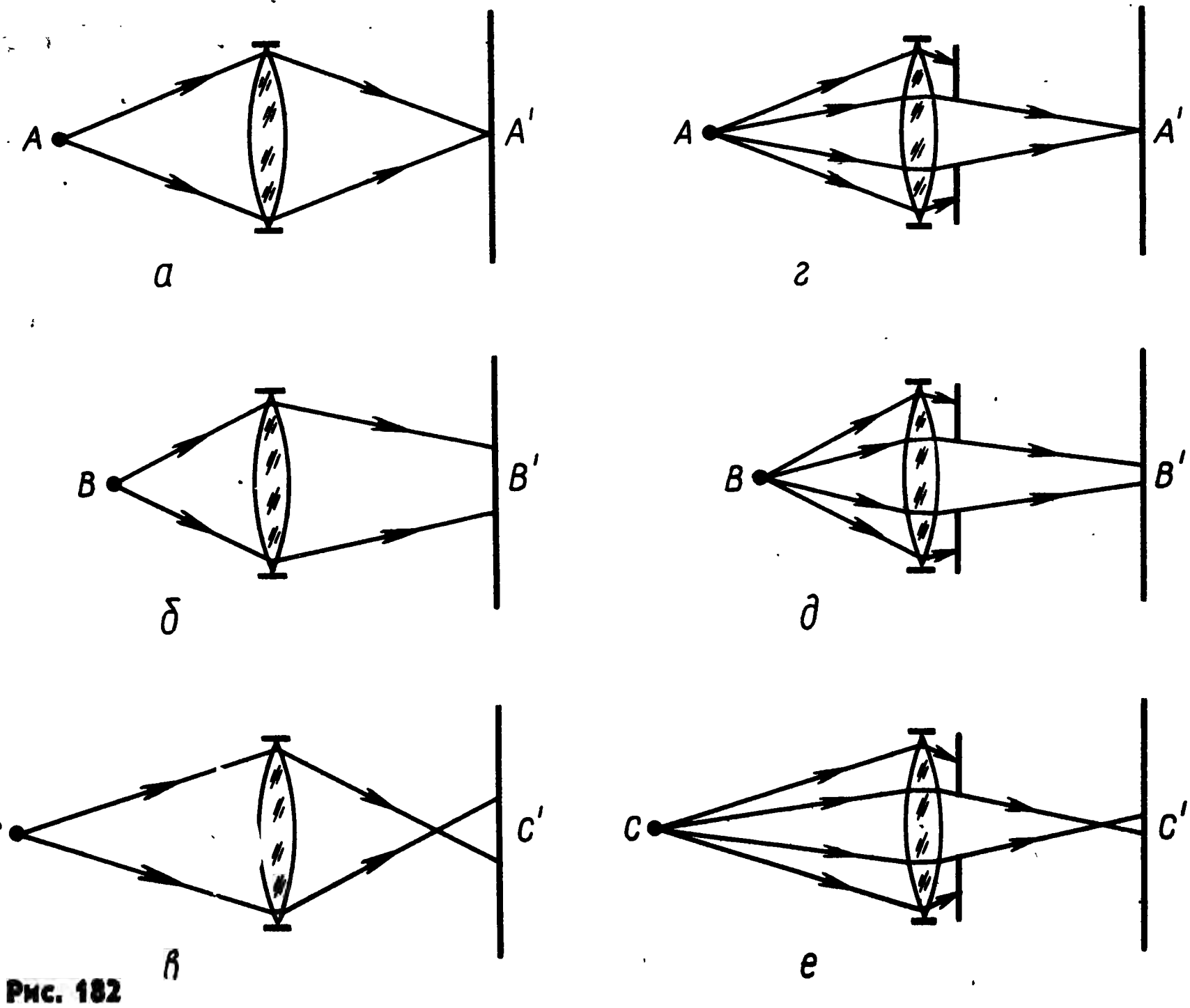


Рис. 182

на некотором расстоянии от аппарата, и изображение этой точки на фотопленке получается также в виде точки (рис. 182, *а*). Тогда изображение точки *B*, расположенной ближе к объективу (рис. 182, *б*), как и изображение точки *C*, расположенной дальше (рис. 182, *в*), получаются в виде небольших кружков. Если перед объективом поместить диафрагму (рис. 182, *г, д, е*), то диаметр этих кружков будет тем меньше, чем меньше диаметр действующей части объектива (рис. 182, *д, е*). Уменьшая отверстие диафрагмы, можно добиться того, что изображения точек, находящихся на разных расстояниях от аппарата, будут достаточно четкими. Возрастет, как говорят, *глубина резкости.*

Проекционный аппарат. Проекционный аппарат предназначен для получения на экране действительного увеличенного изображения предмета. Таким предметом может быть освещенный сзади рисунок или фотоснимок, выполненный на прозрачной основе,— *диапозитив*. Схема устройства проекционного аппарата приведена на рисунке 183. Изображение диапозитива *D* создается на экране с помощью *объектива О*. Система линз *К*, называемая *конденсором*, предназначена для того, чтобы сконцентрировать свет от источника на диапозитиве. Объектив проецирует освещенный диапозитив на экран. Ход лучей от диапозитива до экрана изображен на рисунке.

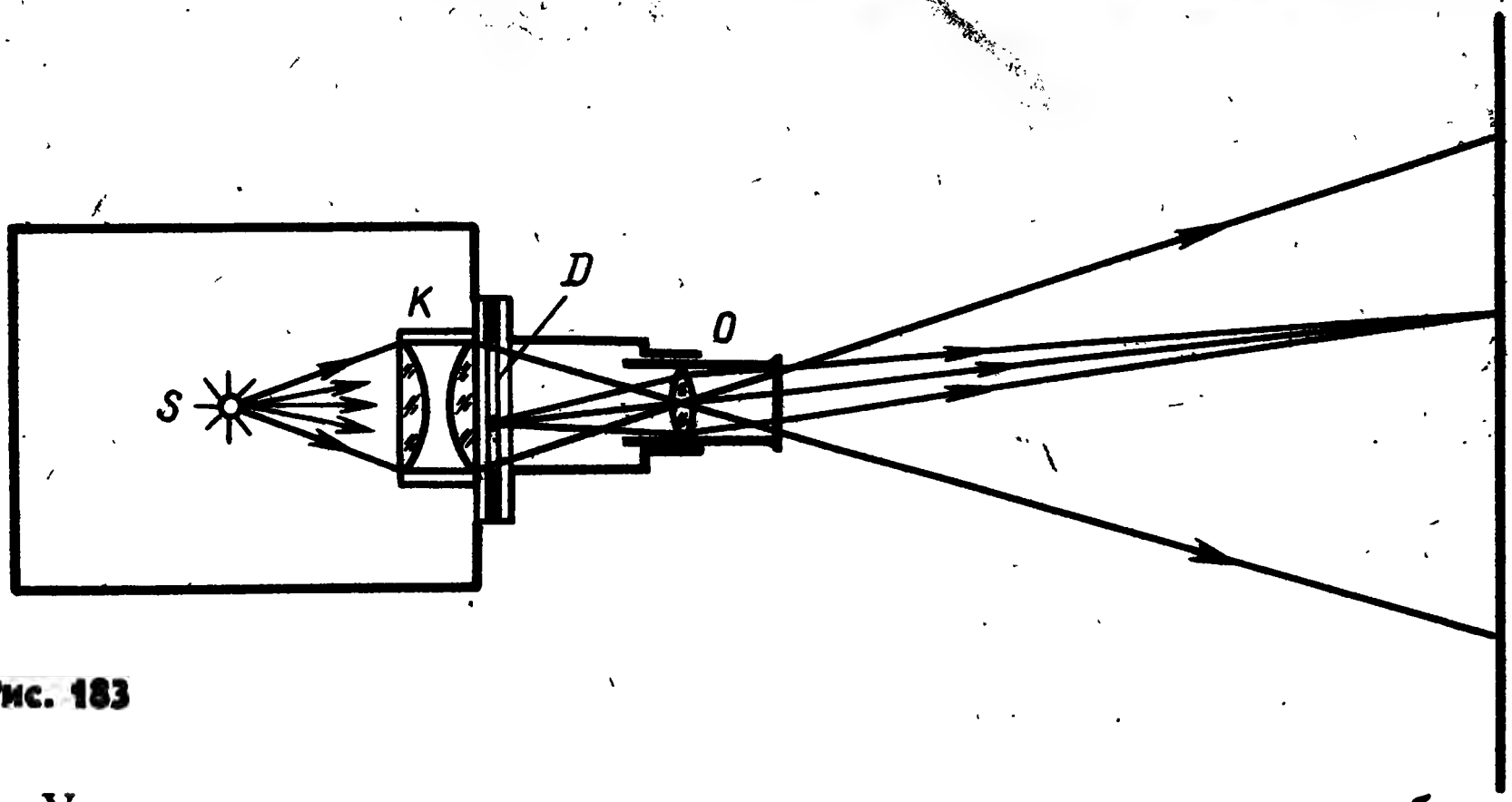


Рис. 183

Увеличение проекционного аппарата можно менять, приближая объектив к диапозитиву или удаляя от него с одновременным изменением расстояния от аппарата до экрана.

Применяются также проекционные аппараты, позволяющие получить на экране изображения как прозрачных, так и непрозрачных объектов. Такие комбинированные приборы называются *эпидиаскопами*. Для получения изображения непрозрачного предмета, например рисунка из книги, его сильно освещают и проецируют на экран.

§ 79. ГЛАЗ. ОЧКИ

Глаз. Глаз человека имеет почти шарообразную форму (рис. 184). Его диаметр около 2,5 см. Снаружи он покрыт защитной оболочкой *1* белого цвета — *склерой*. Передняя прозрачная часть *2* склеры называется *роговой оболочкой* или *роговицей*. На схеме строения глаза видно, что за роговицей на некотором расстоянии расположена *радужная оболочка 3*, окрашенная особым веществом в какой-либо цвет. Между роговицей и радужной оболочкой находится *водянистая жидкость 4*. В радужной оболочке имеется отверстие *5 — зрачок*. В зависимости от интенсивности падающего света диаметр зрачка рефлекторно меняется приблизительно от 2 до 8 мм. Этот процесс подобен изменению диафрагмы фотоаппарата. За зрачком помещается *хрусталик 6* — прозрачное слоистое тело, похожее на линзу. Особая мышца *7* может в некоторых пределах менять форму хрусталика, делая его более выпуклым при рассматривании близких предметов. Остальную часть глаза до задней стенки (глазного дна) занимает прозрачное полужидкое *стекловидное тело 8*. Глазное дно покрыто очень сложной *сетчатой оболочкой 9 (сетчаткой)*, представляющей собой разветвления зрительного нерва *10* с нервными окончаниями в виде *палочек* и *колбочек*. Палочки и колбочки являются светоощущающими элементами.

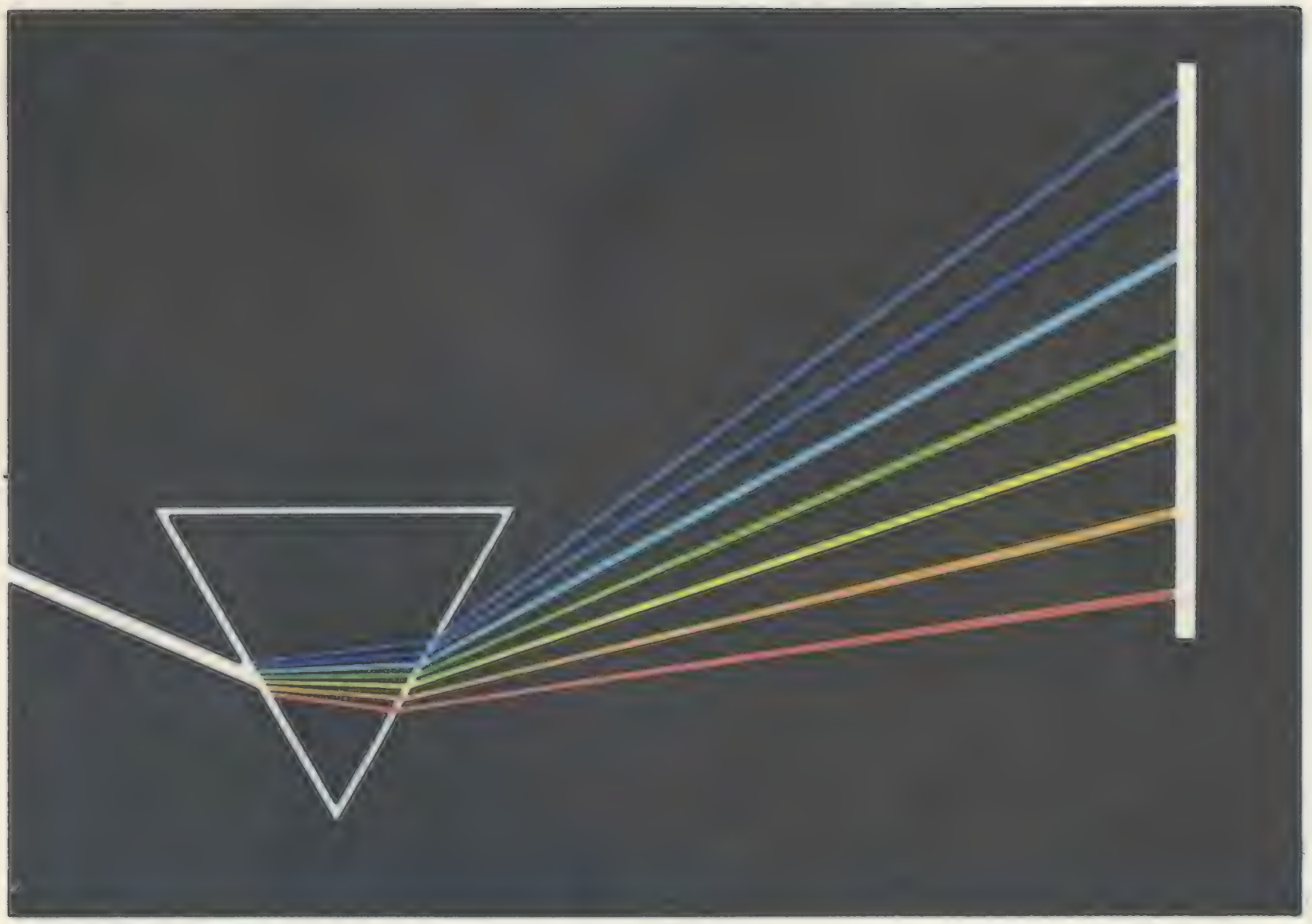


Рис. I. Схема разложения белого света в спектр с помощью призмы.

Рис. II. Разложение и синтез белого света с помощью призм.

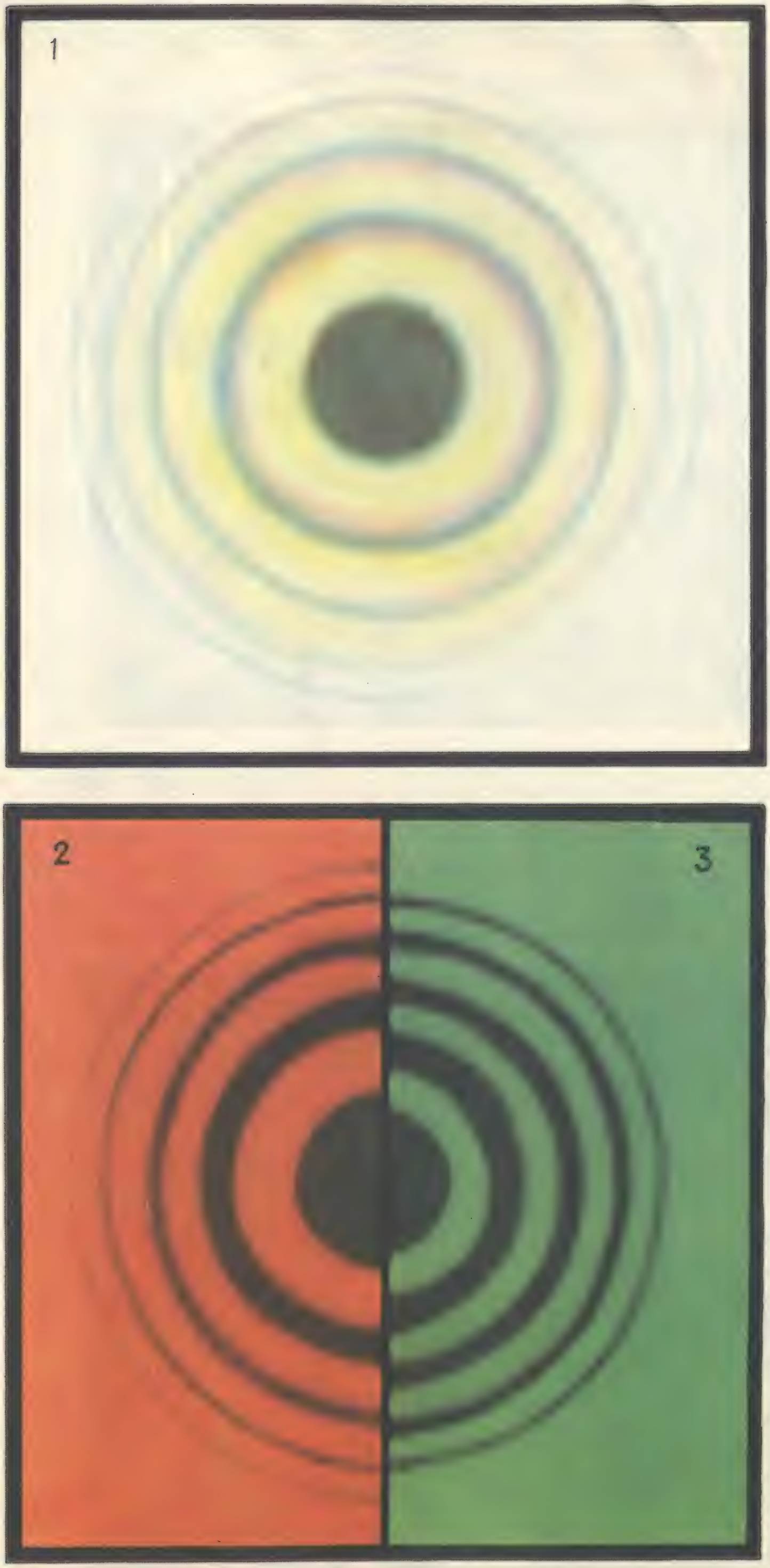


Рис. III. Кольца Ньютона в отраженном свете:
1 — в белом;
2 — в красном;
3 — в зеленом.

Наибольшее преломление лучи света, попадающие в глаз, испытывают на поверхности роговицы. Небольшое дополнительное преломление осуществляет хрусталик. В целом оптическую систему глаза можно рассматривать как собирающую линзу с переменным фокусным расстоянием и неизменной «глубиной» (расстояние от линзы до экрана). «Экраном», на котором образуется действительное обратное изображение рассматриваемого предмета, служит сетчатка. Раздражение нервных окончаний (палочек и колбочек) падающим светом вызывает у нас зрительное ощущение.

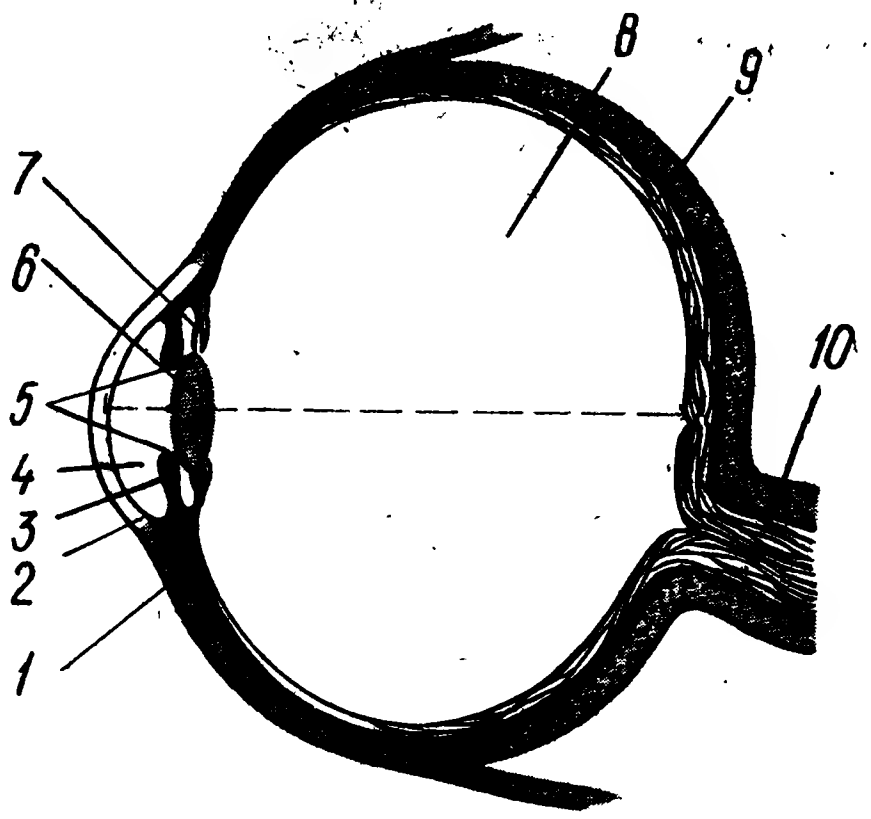


Рис. 184

Если предмет находится очень далеко, изображение получается на сетчатке нормального глаза без какого бы то ни было напряжения мышцы хрусталика. Когда же предмет приближается, происходит сжатие хрусталика и уменьшение фокусного расстояния глаза настолько, что плоскость изображения снова совмещается с сетчаткой. Это достигается рефлекторным напряжением мышцы, изменяющей кривизну хрусталика. Такое приспособление глаза к изменению расстояния до наблюдаемого предмета называется *аккомодацией глаза.* С приближением предмета увеличивается угол зрения φ (рис. 185), под которым мы видим две близкие точки предмета. Когда этот угол становится больше одной минуты, изображения двух точек попадают на разные нервные окончания и мы видим их раздельно. Однако приближать предмет к глазу на очень малое расстояние для рассматривания его мелких деталей не имеет смысла, так как аккомодация глаза имеет предел — *ближнюю точку аккомодации.*

Расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего (без чрезмерного напряжения) рассматривать детали предмета, называется *расстоянием наилучшего зрения.* Для нормального глаза расстояние наилучшего зрения считают равным 25 см. При меньших расстояниях человек с нормальным зрением лишь с трудом аккомодирует свой глаз.

Дальней точкой аккомодации нормального глаза является бесконечно удаленная точка. Она соответствует ненапряженному состоянию глаза.

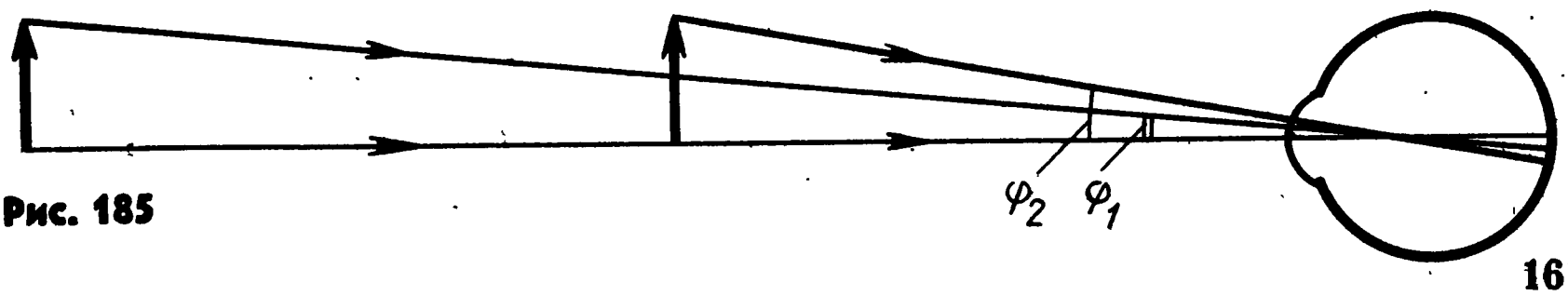


Рис. 185

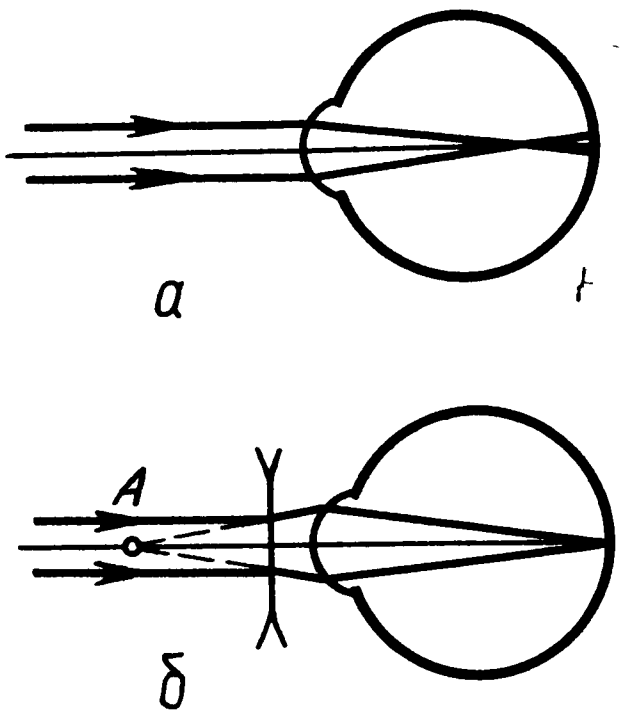


Рис. 186

Глаз человека снабжен мышцами, поворачивающими его так, чтобы ось глаза была направлена на рассматриваемый предмет. Напряжения мышц левого и правого глаза различаются тем сильнее, чем ближе предмет. Кроме того, изображения близкого предмета на сетчатых оболочках правого и левого глаза несколько отличаются друг от друга. Это дает человеку возможность оценивать расстояния до предмета или его частей, а также создает впечатление объемности наблюдаемого тела.

Очки. У многих людей глаза создают в ненапряженном состоянии изображение удаленного предмета не на сетчатке, а перед ней (рис. 186, *а*). Такие люди не могут видеть четко удаленные предметы. Этот дефект зрения называют *близорукостью.* Близорукий четко видит предмет, лишь начиная с некоторого расстояния. Дальняя точка аккомодации глаза не бесконечно удалена. Соответственно меньше и расстояние наилучшего зрения. Близорукость исправляют ношением очков с рассеивающими линзами. Параллельные лучи после того, как они пройдут сквозь такую линзу, воспринимаются как исходящие из дальней точки аккомодации глаза (точка *A* на рис. 186, *б*). Поэтому близорукий, вооруженный очками, может рассматривать удаленные предметы, как и человек с нормальным зрением, т. е. без напряжения.

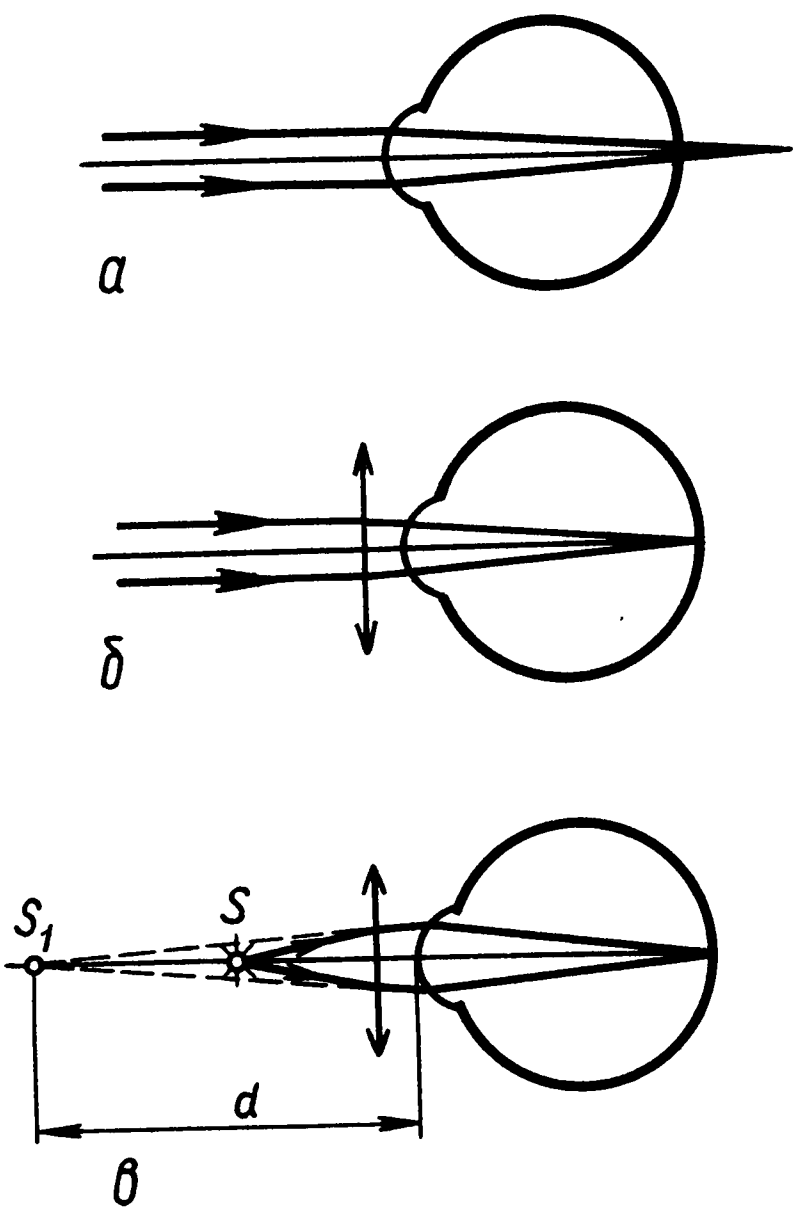


Рис. 187

Дефект зрения, при котором изображения удаленных

предметов получаются за сетчаткой (рис. 187, *а*), называется *дальнозоркостью.* Дальнозоркий должен напрягаться уже при наблюдении далеких предметов, а при наблюдении близких предел аккомодации будет исчерпан при расстоянии до предмета, большем 25 см.

Дальнозоркость исправляют ношением очков с собирающими линзами. Для наблюдения удаленных предметов оптическая сила линзы должна быть такой, чтобы параллельные лучи фокусировались на сетчатке глаза (рис. 187, *б*). Лучи от предмета, находящегося на расстоянии 25 см (рис. 187, *в*), пройдя сквозь эту линзу, станут менее расходящимися, и предмет будет казаться удаленным на расстояние $d > 25$ см, при котором дальнозоркий может рассматривать предмет без заметного напряжения. Следовательно, расстояние наилучшего зрения будет таким же, как и нормального глаза.

§ 80. ЛУПА. МИКРОСКОП

Для того чтобы мелкие детали рассматриваемого предмета были различимы, угол зрения должен быть достаточно велик. Увеличение угла зрения можно было бы получить приближением предмета к глазу, если бы не было предела аккомодации.

Лупа. Увеличение угла зрения при ненапряженном глазе достигается с помощью оптических приборов. Как видно из рисунка 185, большему углу зрения соответствует и большее изображение на сетчатке. При малых углах отношение размеров изображений приблизительно равно отношению углов зрения.

Отношение угла зрения при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения при наблюдении невооруженным глазом принимают за характеристику оптического прибора — его *угловое увеличение.*

Угол зрения, под которым виден предмет невооруженным глазом (рис. 188), равен

$$\varphi = \frac{h}{d_0}, \qquad (6.20)$$

где $d_0 = 25$ см — расстояние наилучшего зрения и h — линейный размер предмета.

Простейший способ увеличения угла зрения при рассмотрении мелких предметов — применение *лупы.* Лупой называют собирающую линзу или систему линз с малым фокусным расстоянием F (как правило, не более 10 см). Лупу помещают обычно близко к глазу, а предмет располагается в ее фокальной плоскости. В этом случае лучи из любой точки объекта после выхода из лупы образуют параллельные пучки (рис. 189). Следовательно, четкое изображение точек на сетчатке получается без напряжения глаза. В лупу предмет виден под углом

$$\varphi_1 = \frac{h}{F}.$$

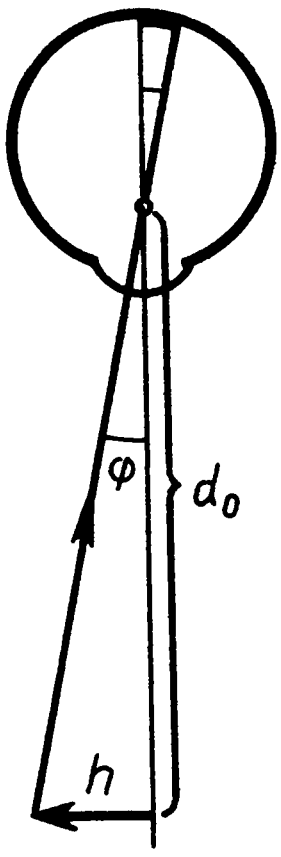


Рис. 188

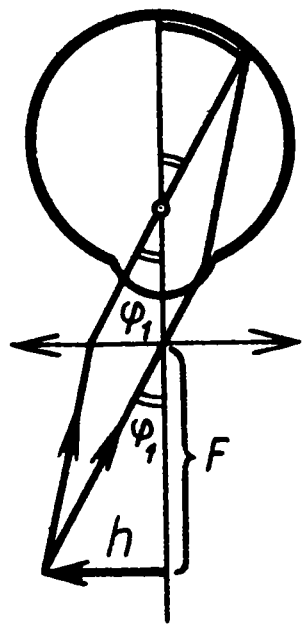


Рис. 189

Найдем угловое увеличение лупы

$$\Gamma = \frac{\varphi_1}{\varphi}. \qquad (6.21)$$

Для этого подставим сюда выражения для φ_1 и φ:

$$\Gamma = \frac{h/F}{h/d_0} = \frac{d_0}{F}. \qquad (6.22)$$

Помещая предмет ближе фокальной плоскости, можно получить немного большее увеличение, чем в случае нахождения предмета в фокальной плоскости. Но это уже требует напряжения глаза.

Микроскоп. Увеличение лупы ограничено тем, что очень малое фокусное расстояние может быть только у линзы малого диаметра, применять которую трудно. Большое увеличение может быть достигнуто путем применения еще одной линзы. Эта линза называется *объективом*. Объектив дает увеличенное действительное изображение объекта, которое затем рассматривается с помощью лупы, называемой в этом случае *окуляром*. Оптический прибор, работающий по такой схеме, называют *микроскопом*.

Для получения действительного увеличенного изображения предмет располагают между фокусом объектива и точкой, находящейся на двойном фокусном расстоянии. Наблюдение в окуляр удобно вести без напряжения глаза. Для этого окуляр размещают так, чтобы изображение, даваемое объективом, было совмещено с фокальной плоскостью окуляра. Ход лучей в микроскопе изображен на рисунке 190. На нем показаны два луча, исходящие из точки A предмета и создающие промежуточное действительное изображение A_1. Попадая на линзу окуляра, лучи преломляются в ней и параллельным пучком входят в глаз, создавая на сетчатке изображение A_2. Микроскоп позволяет различать мелкие детали предметов, которые при наблюдении невооруженным глазом сливаются.

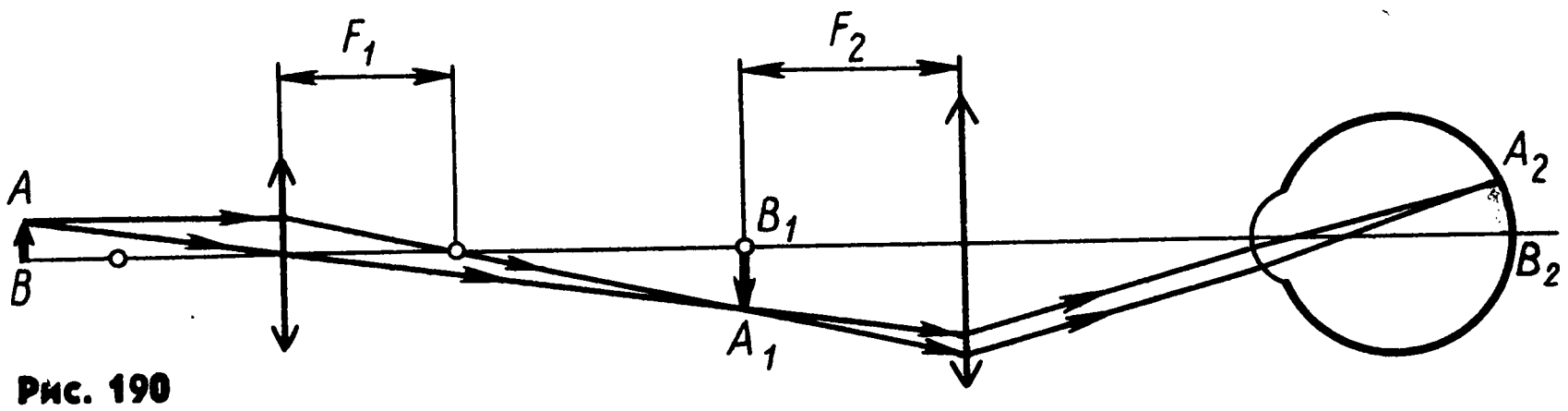


Рис. 190

УПРАЖНЕНИЕ 9

1. На рисунке 191 показаны положение главной оптической оси MN линзы, светящаяся точка S и ее изображение S_1. Найти построением оптический центр линзы и ее фокусы. Определить, собирающей или рассеивающей является эта линза, действительным или мнимым является изображение.

2. Изображение миллиметрового деления шкалы, расположенной перед линзой на расстоянии $d=12{,}5$ см, имеет на экране длину $L=2{,}4$ см.

Каково фокусное расстояние линзы?

3. С помощью линзы на экране получено действительное изображение электрической лампочки.

Как изменится изображение, если закрыть правую половину линзы?

4. Фотоаппарат создает на пленке изображение человеческого лица. Пояснить с помощью чертежа, почему изображение виднеющегося вдали за человеком леса получается нерезким.

В какую сторону следует сместить объектив, чтобы лес изображался четко?

Будет ли при этом четким изображение лица?

5. Почему ныряльщик плохо различает предметы под водой без маски?

6. Построить изображение предмета, помещенного между собирающей линзой и ее фокусом.

7. Предмет находится на расстоянии $d=1{,}8$ м от собирающей линзы. Определить фокусное расстояние линзы, если изображение меньше предмета в 5 раз.

8. На рисунке 192 показаны главная оптическая ось линзы, источник света и его изображение. Найти построением оптический центр и фокусы линзы.

Какая это линза: собирающая или рассеивающая?

Каким является изображение: действительным или мнимым? Рассмотреть случаи: 1) A — источник, B — изображение; 2) B — источник, A — изображение.

9. Построить изображение светящейся точки в рассеивающей линзе, используя три «удобных» луча.

10. Фокусное расстояние объектива проекционного фонаря $F=0{,}25$ м. Какое увеличение Γ диапозитива дает фонарь, если экран удален от объектива на расстояние $f=2$ м?

11. Светящаяся точка находится в фокусе рассеивающей линзы. На каком расстоянии от линзы находится изображение? Построить ход лучей.

12. Построить изображение в собирающей линзе короткой стрелки, наклоненной к оптической оси линзы. Нижний конец стрелки расположен на главной оптической оси на двойном фокусном расстоянии от линзы.

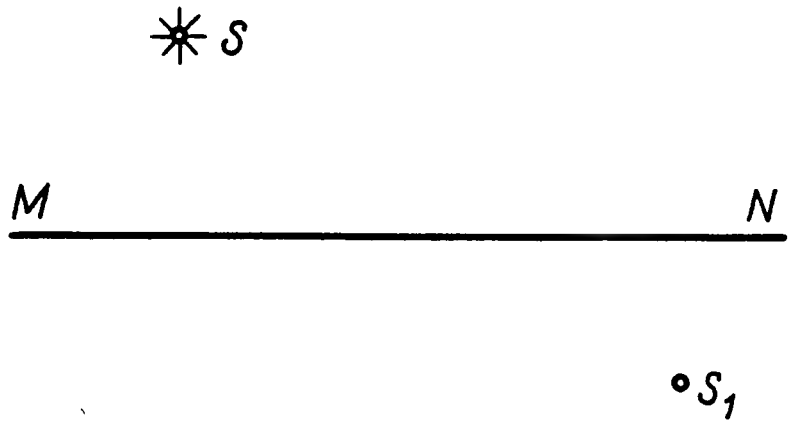


Рис. 191

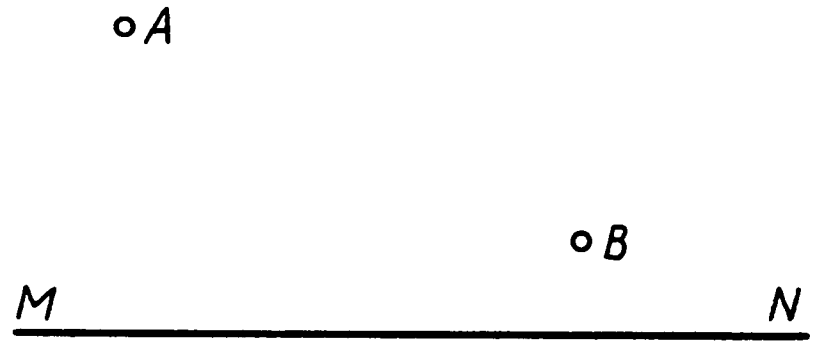


Рис. 192

Глава VII

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

§ 81. СКОРОСТЬ СВЕТА

В *геометрической оптике* исследуется только направление световых лучей. Вопрос о том, как протекает процесс распространения света во времени, выходит за рамки геометрической оптики. Более глубоко свойства света и его взаимодействие с веществом рассматриваются в *физической оптике.* Мы начнем этот раздел с рассказа о том, как была измерена скорость света.

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Делались многочисленные попытки определить скорость света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результатов. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была в конце концов определена.

Астрономический метод измерения скорости света. Скорость света впервые удалось измерить датскому ученому О. Ремеру в 1676 г. Ремер был астрономом, и его успех объясняется именно тем, что проходимые светом расстояния, которые он использовал для измерений, были очень велики. Это расстояния между планетами солнечной системы.

Ремер наблюдал затмения спутников Юпитера — самой большой планеты солнечной системы. Юпитер, в отличие от Земли, имеет целых тринадцать спутников. Ближайший его спутник Ио стал предметом наблюдений Ремера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, а затем погружался в ее тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла громадные небесные часы, через равные промежутки времени посылавшие свои сигналы на Землю.

Вначале измерения производились в то время, когда Земля при своем движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 193). Такие же измерения, проведенные 6 месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера на диаметр своей орбиты, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать на основании знания периода обращения Ио.

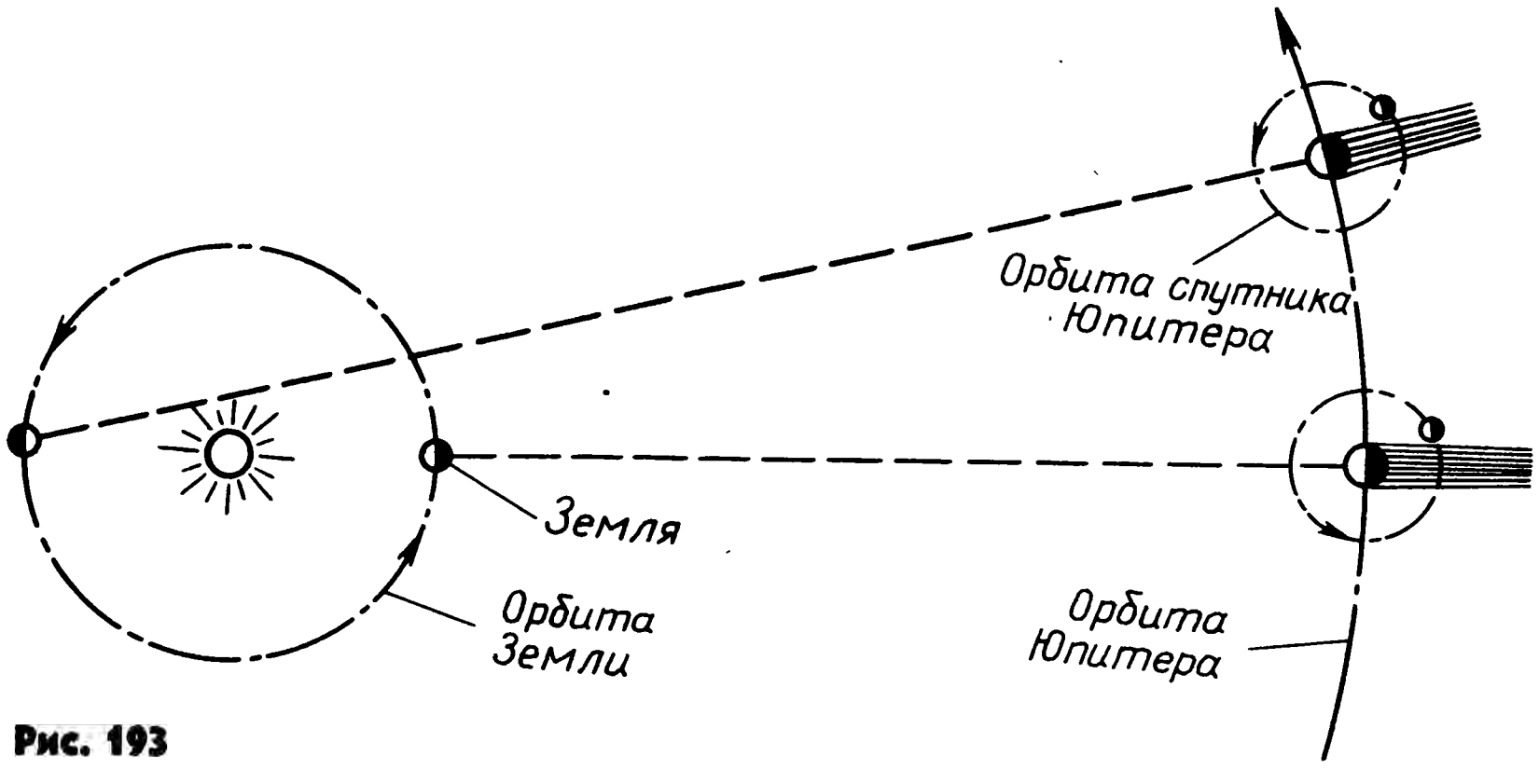


Рис. 193

Ремер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио 22-мя минутами раньше. Замедление в этом случае происходит от того, что свет употребляет 22 мин на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная запаздывание появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость, разделив это расстояние (диаметр орбиты Земли) на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 300 000 км/с[1]. Поэтому-то крайне трудно заметить время распространения света между двумя удаленными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние больше длины земного экватора в 7,5 раза.

Лабораторные методы измерения скорости света. Впервые скорость света лабораторным методом удалось измерить французскому физику И. Физо в 1849 г. Физо пропускал свет между зубцами вращающегося колеса (рис. 194). Далее свет падал на зеркало, находившееся на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости

[1] Сам Ремер вследствие малой точности своих измерений и неточного знания радиуса орбиты Земли получил значение скорости 215 000 км/с.

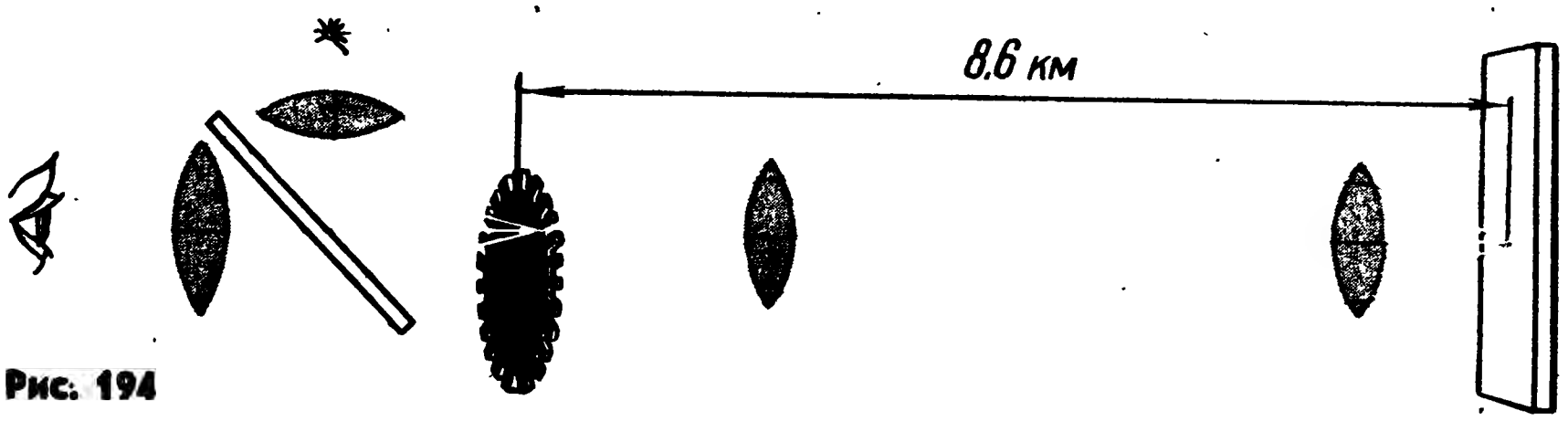


Рис. 194

вращения он постепенно исчезал. В чем же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези стал зубец, и свет перестал быть видимым.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за это время путешествия света до зеркала и обратно колесо успело повернуться настолько, что на место прежней прорези стала уже новая прорезь. Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо расстояние равнялось 8,6 км и для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости света с применением вместо зубчатого колеса вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных веществах. Скорость света в воде была измерена в 1856 г. Она оказалась в $^4/_3$ раза меньше, чем в вакууме. Во всех других веществах она также меньше, чем в вакууме.

По современным данным, скорость света в вакууме равна $299\,792\,456{,}2 \pm 0{,}8$ м/с.

Определение скорости света сыграло в науке очень важную роль. Оно в значительной степени способствовало выяснению природы света. Особое значение скорость света имеет потому, что ни одно тело в мире не может иметь скорость, превышающую скорость света в вакууме.

§ 82. ВЫВОД ЗАКОНА ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Основным понятием геометрической оптики является понятие светового луча. Законы, определяющие направления световых лучей,— закон прямолинейного распространения в однородной среде, законы отражения и преломления — были открыты опытным путем.

Теоретически же законы отражения и преломления света были выведены впервые с помощью волновой теории света Гюйгенса. Гюйгенс рассматривал свет как упругие волны, распространяющиеся в гипотетической среде — эфире, заполняющем все мировое пространство.

Принцип Гюйгенса, о котором рассказывалось в четвертой главе, посвященной механическим волнам, был сформулирован первоначально именно для световых волн.

Этот принцип, как и другие законы волнового движения, справедлив для любых волн, независимо от их природы.

В § 47 был выведен закон отражения для механических волн. Но так как все рассуждения в точности верны применительно и

к световым волнам, то можно сразу считать закон отражения для света доказанным теоретически.

Теперь рассмотрим преломление света при переходе его из одной среды в другую. Пусть на границу раздела двух сред, например воздуха и воды, падает плоская световая волна (рис. 195). Волновая поверхность AC перпендикулярна лучам A_1A и B_1B. Волновую поверхность преломленной волны можно получить, проведя поверхность, касательную

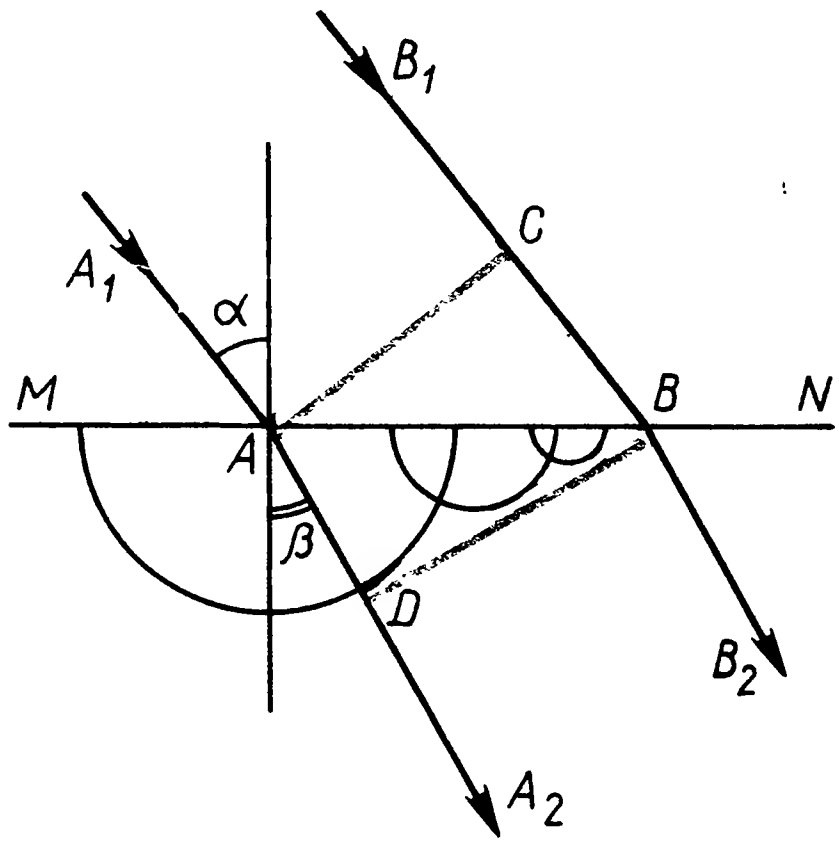


Рис. 195

ко всем вторичным волнам во второй среде, центры которых лежат на границе раздела сред. Поверхности MN сначала достигнет луч A_1A. Если скорость света в первой среде равна v_1, то луч B_1B достигнет поверхности MN спустя время

$$\Delta t = \frac{|CB|}{v_1}.$$

Поэтому в момент, когда вторичная волна в точке B только начнет возбуждаться, волна от точки A уже будет иметь вид сферы с радиусом

$$|AD| = v_2 \cdot \Delta t,$$

где v_2 — скорость света во второй среде.

Волновую поверхность DB преломленной волны мы получим, если из точки B проведем прямую, касательную к сфере с центром в точке A. Угол падения α луча, очевидно, равен углу CAB в треугольнике ABC (стороны одного из этих углов перпендикулярны сторонам другого). Следовательно,

$$|CB| = v_1 \cdot \Delta t = |AB| \sin\alpha. \qquad (7.1)$$

Угол преломления β равен углу ABD треугольника ABD. Поэтому

$$|AD| = v_2 \cdot \Delta t = |AB| \sin\beta. \qquad (7.2)$$

Разделив (7.1) на (7.2), получим закон преломления:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \qquad (7.3)$$

где n — постоянная величина, не зависящая от угла падения. Она называется, как известно, *относительным показателем преломления*. Таким образом, из принципа Гюйгенса не только следует закон преломления, но с его помощью также раскрывается физический смысл относительного показателя преломления; он

равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (7.4)$$

Причем если угол преломления β меньше угла падения α, то согласно (7.3) скорость света во второй среде меньше, чем в первой. Это в точности подтвердили опыты по измерению скорости света в воде и других прозрачных средах.

Пользуясь формулой (7.4), можно выразить относительный показатель преломления n через абсолютные показатели преломления n_1 и n_2 первой и второй сред. Действительно, так как

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \text{ и } n_2 = \frac{c}{v_2},$$

то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \qquad (7.5)$$

§ 83. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Показатель преломления не зависит от угла падения светового пучка, но он зависит от его цвета. Это было открыто Ньютоном.

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и проистекающие отсюда особенности цветов, каких до того никто даже не подозревал» (слова из надписи на могиле Ньютона). Радужную окраску изображения, даваемого линзой, наблюдали, конечно, и до него. Было замечено также что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей прошедших через призму, окрашивается по краям.

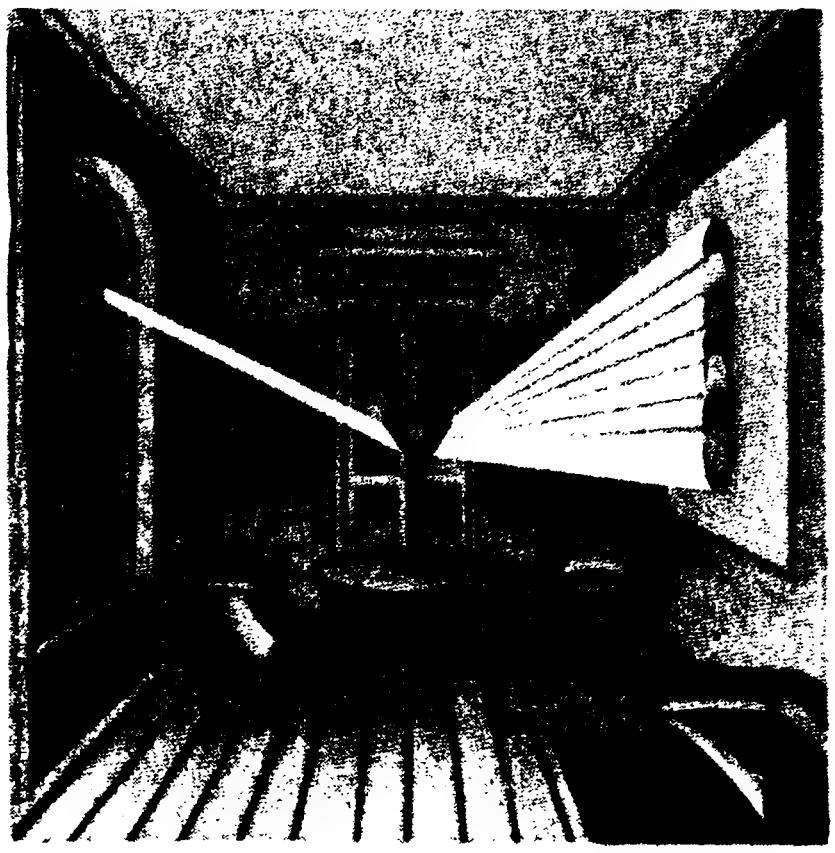


Рис. 196

Основной опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемненную комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлиненное изображение с радужным чередованием цветов

(рис. 196). Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал *спектром*.

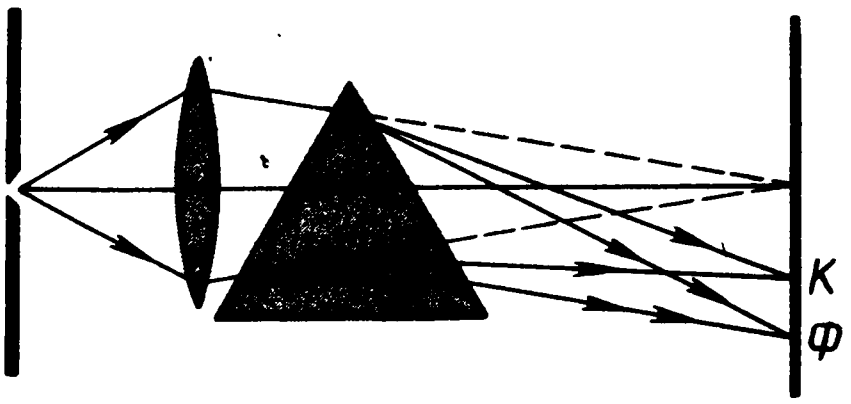


Рис. 197

Закрывая отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрывая синим — синее и т. д. Отсюда следовало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет света, а лишь разлагает его на составные части (рис. I на цветной вклейке). Белый свет имеет сложную структуру. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повернутой на 180° относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет (рис. II на цветной вклейке). Выделив же какую-либо часть спектра, например зеленую, и заставив свет пройти еще через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

Другой важный вывод, к которому пришел Ньютон, был сформулирован им в трактате по «Оптике» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других — красные. **Зависимость показателя преломления света от его цвета носит название дисперсии** (от латинского слова dispergo — разбрасываю).

В дальнейшем Ньютон усовершенствовал свои наблюдения спектра, чтобы получить более чистые цвета. Ведь круглые цветные пятна светового пучка, прошедшего через призму, частично перекрывали друг друга (см. рис. 196). Вместо круглого отверстия использовалась узкая щель, освещенная ярким источником. За щелью располагалась линза, дающая на экране изображение в виде узкой белой полоски. Если на пути лучей поместить призму (рис. 197), то изображение щели растянется в спектр.

Так как показатель преломления зависит от скорости света в веществе, то, очевидно, красный свет, который меньше преломляется, имеет наибольшую скорость, а фиолетовый — наименьшую. Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости лучей разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Ремер, казался бы красным в момент его выхода из тени, а перед погружением в тень — фиолетовым. Но этого не наблюдается.

Зная, что белый свет имеет сложную структуру, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если пред-

мет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаем при этом света нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглотятся слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелеными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зеленые, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее лишь красные лучи, то она будет казаться почти черной.

1. Каков физический смысл показателя преломления света?
2. На тетради написано красным карандашом «отлично» и зеленым «хорошо». Имеются два стекла — зеленое и красное. Через какое стекло надо смотреть, чтобы увидеть оценку «отлично»?
3. Почему только достаточно узкий световой пучок дает спектр после прохождения сквозь призму, а у широкого пучка окрашенными оказываются лишь края?

§ 84. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Перейдем к рассмотрению явлений, доказывающих, что свет представляет собой волны. Любому волновому движению, как говорилось ранее, присущи явления интерференции и дифракции. В том, что свет при распространении обнаруживает волновые свойства, убеждают наблюдения интерференции и дифракции света.

Интерференцию света наблюдали очень давно, но только не отдавали себе в этом отчета. Вы тоже много раз видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов тонкой пленки керосина или нефти на поверхности воды. «Мыльный пузырь, витая в воздухе, ...зажигается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы» (Марк Твен). Именно интерференция света делает мыльный пузырь столь достойным восхищения.

Английский ученый Томас Юнг первым пришел к гениальной мысли о возможности объяснения цветов тонких пленок сложением волн *1* и *2*, одна из которых отражается от наружной поверхности пленки, а вторая — от внутренней (рис. 198). При этом происходит **интерференция световых волн — сложение двух волн, вследствие которого наблюдается усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства.** Результат интерференции (усиление или ослабление результирующих колебаний) зависит от толщины пленки и длины волны.

Рис. 198

Томас Юнг (1773—1829) — замечательный английский ученый с необыкиовенной широтой научных интересов и многогранностью дарований. Юнг одновременно — известный врач и физик с огромной интуицией, астроном и механик, металлург и египтолог, физиолог и полиглот, талантливый музыкант и даже способный гимнаст.

Главными заслугами Юнга являются открытие интерференции света (термин *интерференция* принадлежит Юигу) и объяснение явления дифракции на основе волновой теории. Юиг первым измерил длину световой волны.

Усиление света произойдет в том случае, если преломленная волна *2* отстанет от отраженной волны *1* на целое число длин волн. Если же вторая волна отстанет от первой на полувину длины волны или на нечетное число полуволн, то произойдет ослабление света.

Для того чтобы при сложении волн образовывалась устойчивая интерференционная картина, волны должны быть *когерентными,* т. е. должны иметь одинаковую длину волны и постоянную разность фаз. Когерентность волн, отраженных от наружной и внутренней поверхности пленки, обеспечивается тем, что обе они являются частями одного светового пучка. Волны же, испущенные двумя обычными независимыми источниками, не дают интерференционной картины из-за того, что разность фаз двух волн от таких источников не постоянна.

Юнг также понял, что **различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн).** Световым потокам различного цвета соответствуют волны различной длины. Для взаимного усиления (или гашения) волн, различающихся друг от друга длиной, требуется различная толщина пленки. Следовательно, если пленка имеет неодинаковую толщину, то при освещении ее белым светом должны появиться различные цвета.

Зная, от какой физической характеристики световой волны зависит цвет, можно дать более глубокое, чем в предыдущем параграфе, определение дисперсии света.

Дисперсией называется зависимость показателя преломления света от частоты колебаний (или длины волны).

§ 85. КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Простая интерференционная картина возникает в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и положенной на нее плоско-выпуклой линзой большого радиуса кривизны. Эта интерференционная картина имеет вид концентрических колец, получивших название колец Ньютона.

Возьмите линзу с малой кривизной поверхности и положите ее на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая поверх-

ность линзы (лучше через лупу), вы обнаружите в месте соприкосновения линзы и пластины темное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец. Расстояния между соседними кольцами быстро убывают по мере увеличения их радиуса (рис. III, 1 на цветной вклейке). Это и есть кольца Ньютона. Ньютон наблюдал и исследовал их очень внимательно не только в белом свете, но и при освещении линзы одноцветным (монохроматическим) пучком. Радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному; красные кольца имеют максимальный радиус (рис. III, 2 и III, 3 на цветной вклейке). Все это вы можете проверить с помощью самостоятельных наблюдений.

Объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог. Впервые это удалось Юнгу. Проследим за ходом его рассуждений. В их основе лежит предположение о том, что свет — это волны. Рассмотрим случай, когда волна определенной длины падает перпендикулярно на плоско-выпуклую линзу (рис. 199). Волна *1* появляется в результате отражения от выпуклой поверхности линзы на границе стекло — воздух, а волна *2* — в результате отражения от пластины на границе воздух — стекло. Эти волны когерентны: они имеют одинаковую длину и постоянную разность фаз, которая возникает из-за того, что волна *2* проходит больший путь, чем волна *1*.

Если вторая волна отстанет от первой на целое число длин волн [1], то, складываясь, волны усиливают друг друга. Вызываемые ими колебания происходят в одной фазе.

Напротив, если вторая волна отстанет от первой на нечетное число полуволн, то колебания, вызванные ими, будут происходить в противоположных фазах и происходит взаимное гашение волн.

§ 86. ДЛИНА СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Если известен радиус кривизны линзы R, то можно вычислить, на каких расстояниях от точки соприкосновения линзы со стеклянной пластиной разности хода таковы, что волны определенной длины λ гасят друг друга. Эти расстояния и являются радиусами темных колец Ньютона. Ведь линии постоянной толщины воздушной прослойки представляют собой окружности.

Найдем связь между радиусом k-го темного кольца r_k и толщиной воздушной прослойки h_k. Согласно теореме Пифагора (рис. 200)

$$R^2 = r_k^2 + (R - h_k)^2.$$

---

[1] Разность хода волн *1* и *2* не равна удвоенной толщине воздушной прослойки между линзой и пластиной в том месте, куда падает волна от источника света. При отражении от стеклянной пластины происходит изменение фазы колебаний световой волны на π, что означает увеличение разности хода дополнительно на $\frac{\lambda}{2}$. Мы не будем обсуждать это усложняющее обстоятельство.

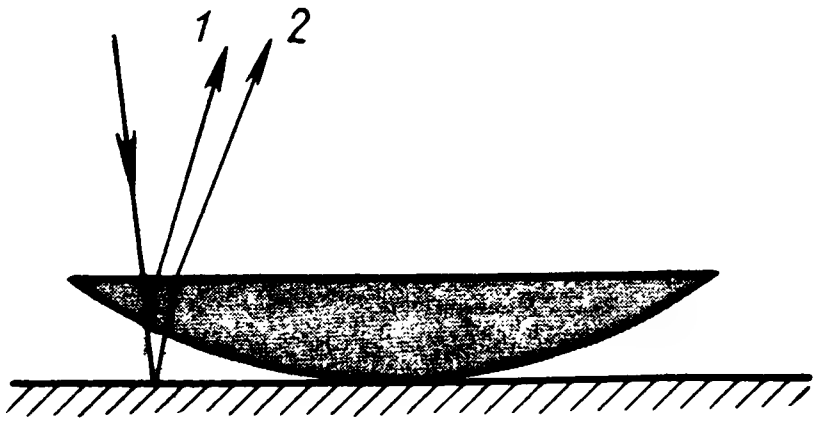


Рис. 199

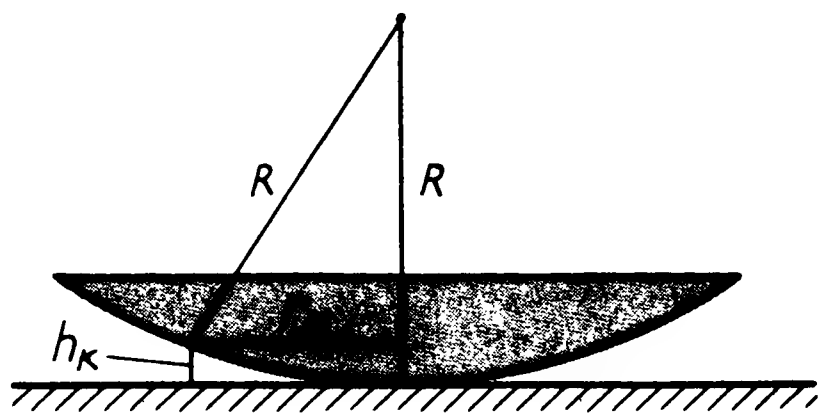


Рис. 200

Отсюда $2Rh_k = r_k^2 + h_k^2$. Так как радиус кривизны линзы велик по сравнению с длиной волны и по сравнению с h_k, то $h_k \ll r_k$. Поэтому $2Rh_k \approx \approx r_k^2$, или

$$h_k \approx \frac{r_k^2}{2R}. \qquad (7.6)$$

Вторая волна проходит путь на $2h_k$ больший, чем первая. Кроме того, из-за изменения фазы колебаний этой волны при отражении на π разность хода дополнительно увеличивается на $\frac{\lambda}{2}$ (см. примечание на предыдущей странице). Условие минимума интерференционной картины (см. § 46) запишется так:

$$2h_k + \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}(2k+1),$$

где $k=0, 1, 2, \ldots$.

Подставляя в эту формулу выражение (7.6) для h_k, определим радиус r_k в зависимости от λ и R:

$$r_k = \sqrt{k\lambda R}. \qquad (7.7)$$

Измерив радиус одного из колец, зная его порядковый номер и радиус кривизны линзы, можно определить длину волны.

Для красного света измерения дают $\lambda_{кр}=8\cdot10^{-5}$ см, а для фиолетового — $\lambda_ф=4\cdot10^{-5}$ см. Длины волн, соответствующие другим цветам спектра, принимают промежуточные значения (см. рисунок V на цветной вклейке). Для любого цвета длина световой волны очень мала. Представьте себе среднюю морскую волну длиной в несколько метров, которая увеличилась настолько, что заняла весь Атлантический океан от берегов Америки до Европы. Длина световой волны в том же увеличении лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

Таким образом, исследование интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны. Одновременно выясняется, что, подобно тому как высота звука определяется его частотой, цвет света определяется длиной волны или частотой колебаний (вспомните, что между длиной волны, частотой и скоростью существует связь: $\lambda\nu = c$).

Вне нас в природе нет никаких красок, есть лишь волны разной длины. Глаз — сложный физический прибор, способный

различать незначительную (около 10^{-6} см) разницу в длине световых волн. Интересно, что большинство животных не способны различать цвета. Они всегда видят черно-белую картину.

При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно обнаружить так. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления n воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшатся.

Почему это происходит? Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-нибудь среду скорость света уменьшается в n раз. Так как $v=\lambda\nu$, то при этом должна уменьшиться в n раз либо частота, либо длина волны. Но радиусы колец зависят от длины волны. Следовательно, когда свет входит в среду, изменяется в n раз именно длина волны, а не частота.

§ 87. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Применения интерференции очень важны и обширны.

Существуют специальные приборы — *интерферометры,* действие которых основано на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: точное измерение длин световых волн, измерение показателя преломления газов и др. Имеются интерферометры специального назначения.

Мы остановимся только на двух применениях интерференции.

Проверка качества обработки поверхностей. С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до $^1/_{10}$ длины волны, т. е. с точностью до 10^{-6} см. Для этого нужно создать тонкую клиновидную прослойку воздуха между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластиной (рис. 201). Тогда неровности поверхности до 10^{-6} см вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней грани эталонной пластины.

Просветление оптики. Объективы современных фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и различные другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стекол — линз, призм и др. Проходя через такие устройства, свет отражается от многих поверхностей. Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10, а в перископах подводных лодок доходит до 40. При падении света перпендикулярно поверхности от нее отражается 5—9% всей энергии. Поэтому сквозь прибор часто проходит всего 10—20% поступающего в него света. В результате этого освещенность изображения получается малой. Кроме того, ухудшается качество изображения. Часть светового пучка после многократного отражения от внутренних поверхностей все же проходит через оптический прибор, но рассеивается и уже не участвует в

создании четкого изображения. На фотографических изображениях, например, по этой причине образуется «вуаль».

Для устранения этих неприятных последствий отражения света от поверхностей оптических стекол надо уменьшить коэффициент отражения. Даваемое прибором изображение делается при этом ярче, «просветляется». Отсюда и происходит термин *просветление оптики.*

Рис. 201

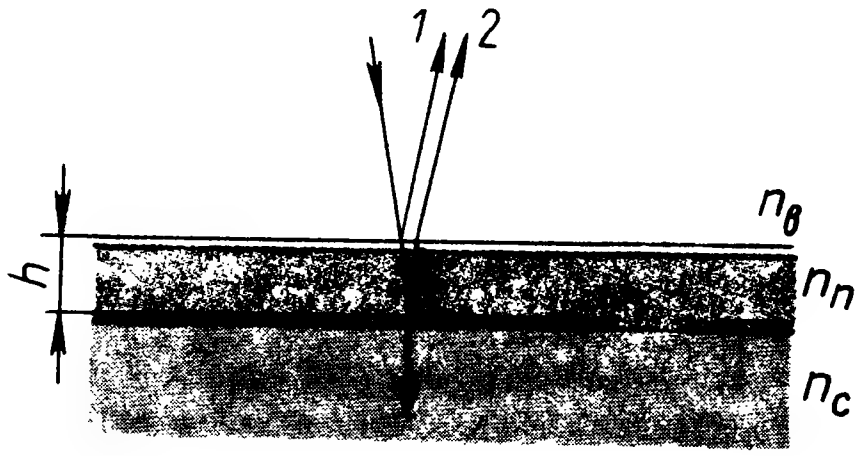


Рис. 202

Просветление оптики основано на интерференции. На поверхность оптического стекла, например линзы, наносят тонкую пленку с показателем преломления $n_п$, меньшим показателя преломления стекла $n_с$. Для простоты рассмотрим случай нормального падения света на пленку (рис. 202).

Разность хода световых волн *1* и *2*, отраженных от верхней и нижней поверхностей пленки, равна удвоенной толщине пленки $2h$. Длина волны $\lambda_п$ в пленке меньше длины волны λ в вакууме в $n_п$ раз:

$$\lambda_п = \frac{\lambda}{n_п}.$$

Для того чтобы волны *1* и *2* ослабляли друг друга, разность хода должна равняться половине длины волны в пленке [1]:

$$2h = \frac{\lambda}{2n_п}. \qquad (7.8)$$

Если амплитуды обеих отраженных волн одинаковы или очень близки друг к другу, то гашение света будет полным. Чтобы добиться этого, подбирают соответственным образом показатель преломления пленки, так как интенсивность отраженного света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

На линзу при обычных условиях падает белый свет. Выражение (7.8) показывает, что требуемая толщина пленки зависит от длины волны. Поэтому осуществить гашение отраженных волн всех частот невозможно. Толщину пленки подбирают так, чтобы полное гашение при нормальном падении имело место для длин

---

[1] В случае, когда показатель преломления воздуха $n_в < n_п$, а $n_п < n_с$, при отражении от поверхности пленки и от поверхности стекла происходит изменение фазы на π. В результате эти отражения не влияют на разность фаз волн *1* и *2*; она определяется только толщиной пленки.

волн средней части спектра (зеленый цвет, $\lambda_з = 5{,}5 \cdot 10^{-5}$ см); она должна быть равна четверти длины волны в пленке [1]:

$$h = \frac{\lambda_з}{4n_п}.$$

Отражение света крайних участков спектра — красного и фиолетового — ослабляется незначительно. Поэтому объектив с просветленной оптикой в отраженном свете имеет сиреневый оттенок. Сейчас даже простые дешевые фотоаппараты имеют просветленную оптику.

В заключение подчеркнем, что гашение света светом не означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, гашение волн друг другом в данном участке пространства означает, что световая энергия сюда просто не поступает. Гашение отраженных волн, следовательно, означает, что весь свет проходит сквозь объектив.

?

1. Как получают когерентные световые волны?
2. В чем состоит явление интерференции света?
3. С какой физической характеристикой световых волн связано различие в цвете?
4. После удара камнем по прозрачному льду возникают трещины, переливающиеся всеми цветами радуги. Почему?
5. Длина волны в воде уменьшается в n раз (n — показатель преломления воды относительно воздуха). Означает ли это, что ныряльщик под водой не может видеть окружающие предметы в естественном свете?
6. Перечислите основные применения интерференции.

§ 88. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Если свет представляет собой волновой процесс, то, кроме интерференции, должна наблюдаться и *дифракция света*. Ведь дифракция — огибание волнами препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко. Дело в том, что волны заметным образом огибают препятствия, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны очень мала.

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света. Светлое пятно против отверстия будет большего размера, чем это следует ожидать при прямолинейном распространении света.

Опыт Юнга. В 1802 г. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 203). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких

[1] Практически наносят слой, толщина которого на целое число длин волн больше. Это удобнее. Промышленный метод нанесения на поверхности оптических стекол тонких пленок был разработан советскими учеными И. В. Гребенщиковым, А. Н. Терениным и др.

отверстия *B* и *C* на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим в свою очередь через малое отверстие *A* в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия *A* возбуждала в отверстиях *B* и *C* когерентные колебания. Вследствие дифракции из отверстий *B* и *C* выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаруживал, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.

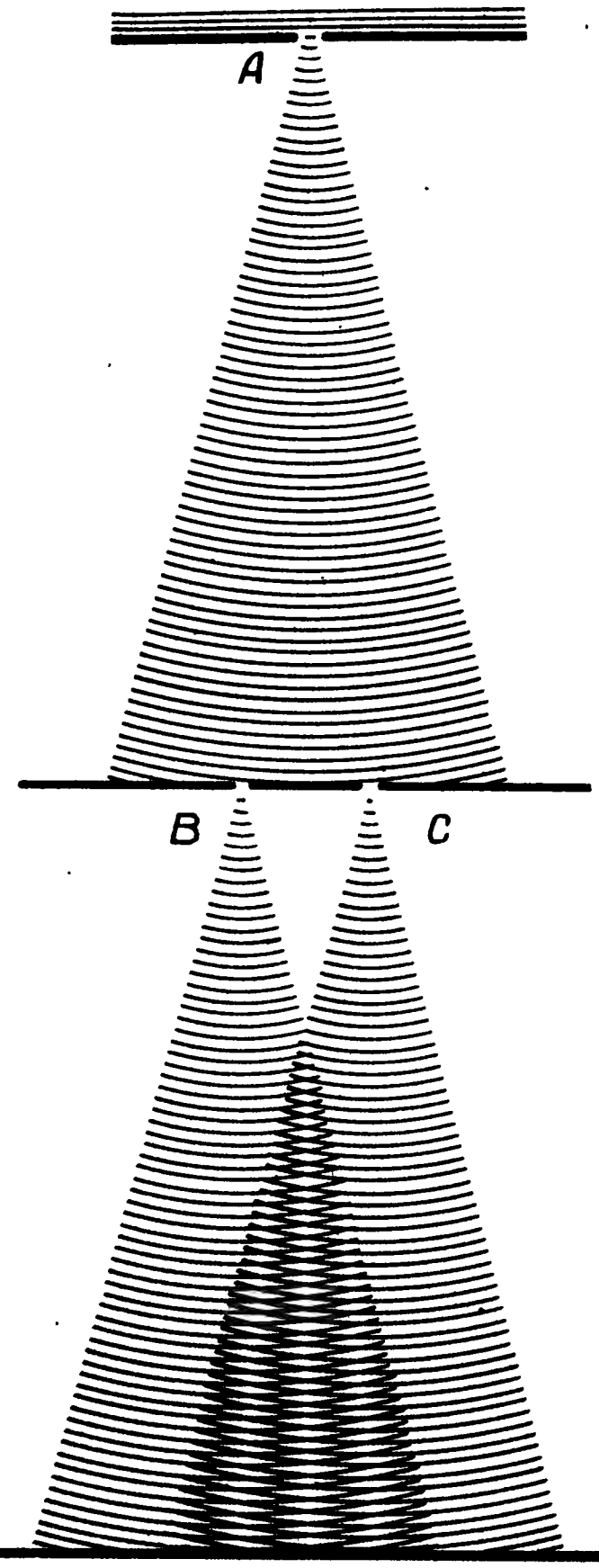


Рис. 203

Теория Френеля. Исследование дифракции получило свое завершение в работах Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и построил количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

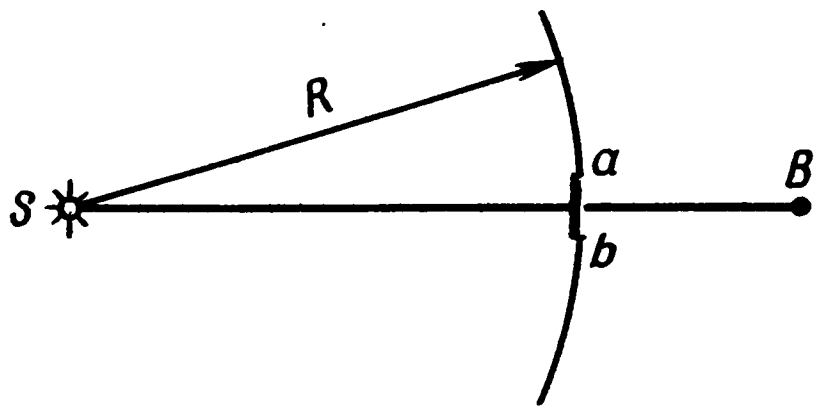


Рис. 204

Огюстен Френель (1788—1827) — выдающийся французский физик. Френель заложил основы современной волновой оптики. Дополнив принцип Гюйгенса идеей интерференции вторичных волн, он построил количественную теорию дифракции.

Поперечность световых волн впервые была доказана Френелем. Полученные Френелем формулы для амплитуд и фаз отраженной и преломленной волн сохранили свое значение до наших дней.

Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Об этом кратко уже упоминалось в четвертой главе.

Для того чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, надо мысленно окружить источник света замкнутой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке пространства.

Такого рода расчеты позволили понять, каким образом свет от точечного источника S, испускающего сферические волны, достигает произвольной точки пространства B (рис. 204). Если рассмотреть вторичные источники на сферической волновой поверхности радиуса R, то результат интерференции вторичных волн от этих источников в точке B оказывается таким, как если бы лишь вторичные источники на малом сферическом сегменте ab посылали свет в точку B. Вторичные волны, испущенные источниками, расположенными на остальной части поверхности, гасят друг друга в результате интерференции. Поэтому все происходит так, как если бы свет распространялся лишь вдоль прямой SB, т. е. прямолинейно.

Одновременно Френель рассмотрел количественно дифракцию на различного рода препятствиях.

Любопытный случай произошел на заседании Французской Академии наук в 1818 г. Один из ученых, присутствовавших на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу. При определенных размерах отверстия и определенных расстояниях от отверстия до источника света и экрана в центре светлого пятна должно находиться темное пятнышко. За маленьким непрозрачным диском, наоборот, должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление ученых, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле.

Дифракционные картины от различных препятствий. Из-за того, что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения неве-

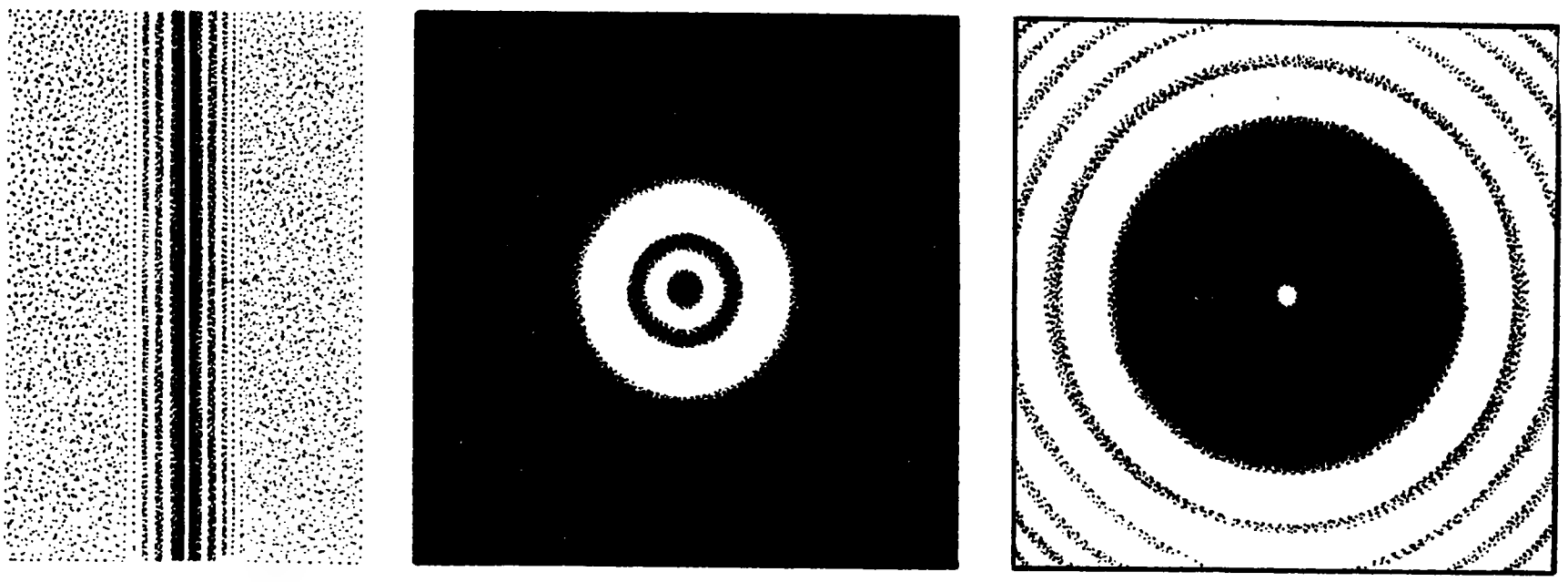
лик. Поэтому для отчетливого наблюдения дифракции (в частности, в тех случаях, о которых только что говорилось) расстояние между препятствием, которое огибается светом, и экраном должно быть велико.

На рисунке 205 показано, как выглядят на фотографиях дифракционные картины от различных препятствий: а) тонкой проволочки; б) круглого отверстия; в) круглого экрана.

Разрешающая способность микроскопа и телескопа. Волновая природа света налагает предел на возможность различения деталей предмета или очень мелких предметов при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчетливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы, из-за чего изображения получаются «размытыми». Никакое увеличение не поможет различать детали предмета, если их «размытые» изображения сливаются. Это происходит, когда линейные размеры предметов меньше длины световой волны.

Дифракция налагает также предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн на оправе объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и темных колец. Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга и глаз не в состоянии различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива.

Границы применимости геометрической оптики. Исследования явления дифракции совершенно отчетливо показывают приближенный характер законов геометрической оптики. **Закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света много больше длины световой волны.**



а б в

Рис. 205

§ 89. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

На явлении дифракции основано устройство замечательного оптического прибора — *дифракционной решетки.* Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками (рис. 206). Хорошая решетка изготовляется с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянной пластине параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов превышает 100 000. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решетки, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Наилучшими качествами обладают так называемые *отражательные решетки.* Они представляют собой чередование участков, отражающих свет и рассеивающих его. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованной металлической пластине.

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих полос) a, а ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) b, то величина $d=a+b$ называется *периодом решетки.* Рассмотрим основные моменты элементарной теории дифракционной решетки. Пусть на решетку падает плоская монохроматическая волна длины λ (рис. 207).

Вторичные источники в щелях создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим для этого волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом φ. Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна длине отрезка AC. Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника ABC можно найти длину катета AC:

$$|AC| = |AB| \sin\varphi = d \sin\varphi.$$

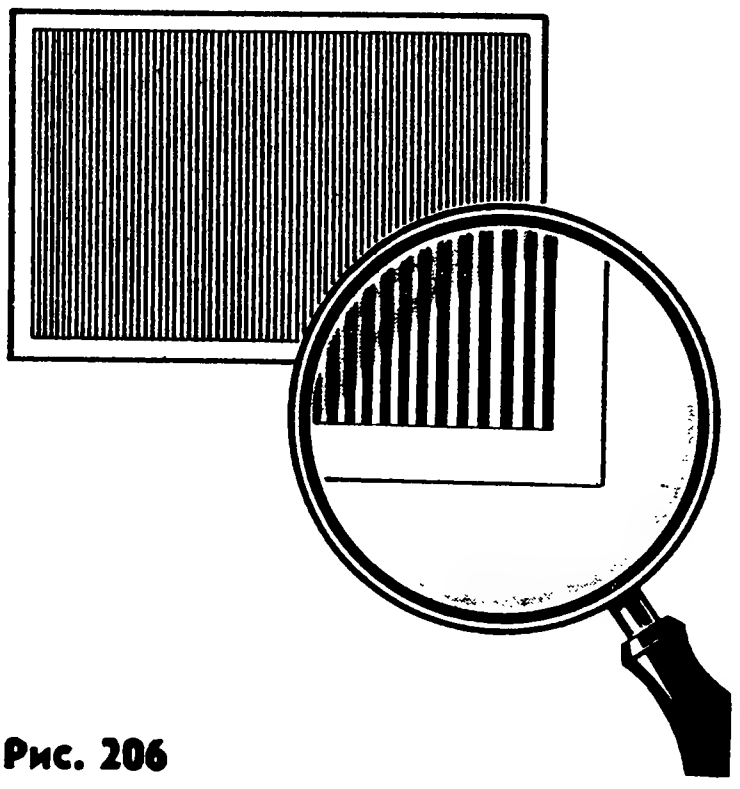


Рис. 206

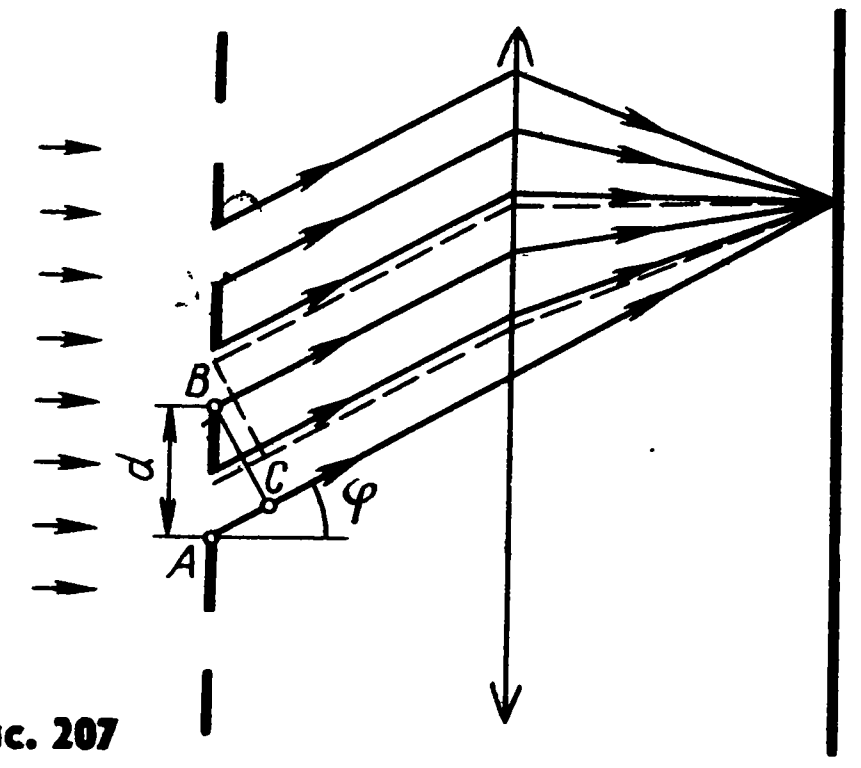


Рис. 207

Максимумы будут наблюдаться под углом φ, определяемым условием

$$d \sin \varphi = k\lambda, \qquad (7.9)$$

где $k=0, 1, 2, \ldots$. Эти максимумы называются *главными.*

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия (7.9) усиливаются не только волны, идущие от нижних (по рисунку) краев щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели на расстоянии d. Поэтому разность хода испущенных этими точками вторичных волн равна $k\lambda$, и эти волны взаимно усиливаются.

За решеткой помещается собирающая линза, в фокальной плоскости которой расположен экран. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке, в которой и происходит сложение волн и их взаимное усиление. Углы φ, удовлетворяющие условию (7.9), определяют положение максимумов на экране.

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего $k=0$) зависит от длины волны, то решетка разлагает белый свет в спектр (рис. IV, 1 на цветной вклейке). Чем больше λ, тем дальше располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны, от центрального максимума (рис. IV, 2 и 3 на цветной вклейке). Каждому значению k соответствует свой спектр.

С помощью дифракционной решетки можно производить очень точные измерения длины волны. Если период решетки известен, то определение длины волны сводится к измерению угла φ, соответствующего направлению на максимум.

Наши ресницы с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решетку. Поэтому если посмотреть, прищурившись, на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Белый свет разлагается в спектр при дифракции вокруг ресниц. Долгоиграющая пластинка с ее бороздками, проходящими близко друг от друга, подобна отражательной дифракционной решетке. Если вы посмотрите на отраженный ею свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр. Можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям k. Картина будет очень четкой, если свет от лампочки падает на пластинку под большим углом.

§ 90. ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн — продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам. В то время световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и прони-

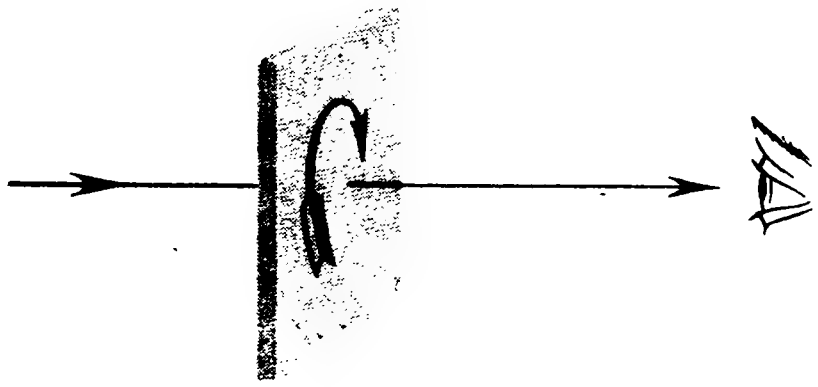


Рис. 208

кающем внутрь всех тел. Поперечные волны могут существовать только в твердом теле (см. гл. IV). Но как могут тела двигаться в твердом эфире, не встречая сопротивления? Ведь эфир не должен препятствовать движению тел. В противном случае не выполнялся бы закон инерции.

Однако постепенно набиралось все больше и больше фактов, которые никак не удавалось истолковать, считая световые волны продольными. Под давлением этих фактов Френель в конце концов вынужден был признать поперечность световых волн, несмотря на то, что это казалось чрезвычайно странным с точки зрения теории механического эфира как носителя световых волн.

Поперечность световых волн доказана многочисленными экспериментами. Рассмотрим подробно только один из них, очень простой и исключительно эффектный. Это опыт с кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зеленой окраски).

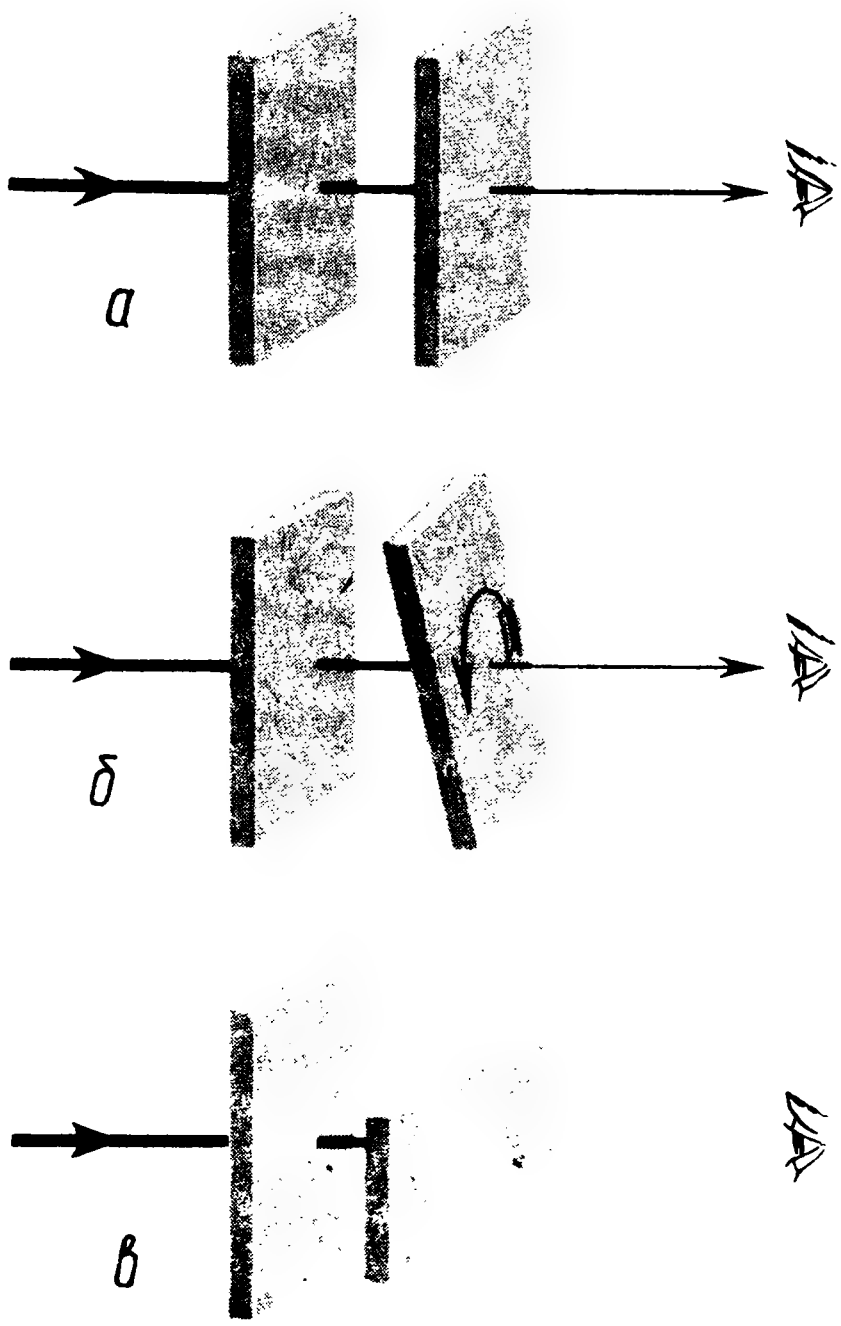


Рис. 209

Кристалл турмалина имеет ось симметрии и принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмем прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из ее сторон совпала с осью кристалла. Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или Солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через нее, не вызовет (рис. 208). Можно поду-

мать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрел зеленоватую окраску. Больше ничего не произошло. Но это не так. Световая волна приобрела новые свойства!

Эти новые свойства обнаруживаются, если пучок заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 209, *а*), параллельный первому. При одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок еще более ослабляется за счет поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 209, *б*), то обнаружится удивительное гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 209, *в*). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

Из этих опытов следуют два факта. В о - п е р в ы х, световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность не менялась). В о - в т о р ы х, волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча получается та или иная интенсивность прошедшего света).

Продольные волны обладают полной симметрией по отношению к направлению распространения (колебания происходят вдоль этого направления, и оно является осью симметрии волны). Поэтому объяснить опыт с вращением второй пластинки, считая световую волну продольной, невозможно.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения.

П е р в о е п р е д п о л о ж е н и е относится к самому свету. **Свет — поперечная волна. Но в падающем от обычного источника пучке волн присутствуют колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн** (рис. 210).

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной. Волны, к примеру, на поверхности воды такой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

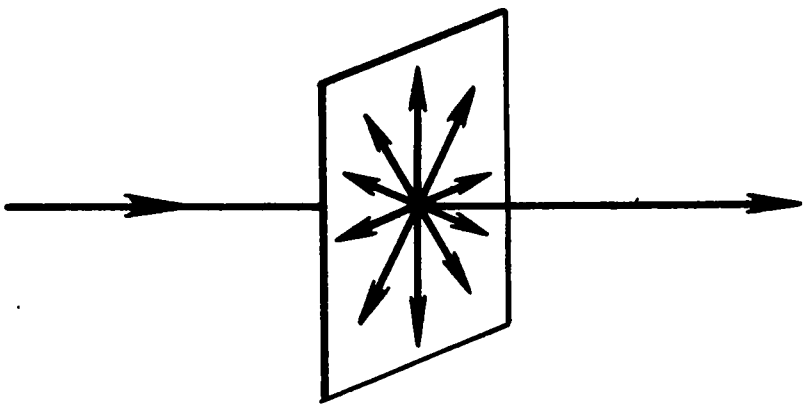


Рис. 210

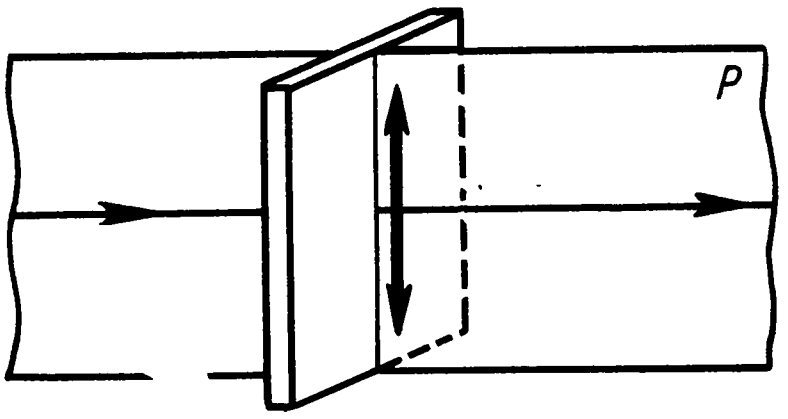


Рис. 211

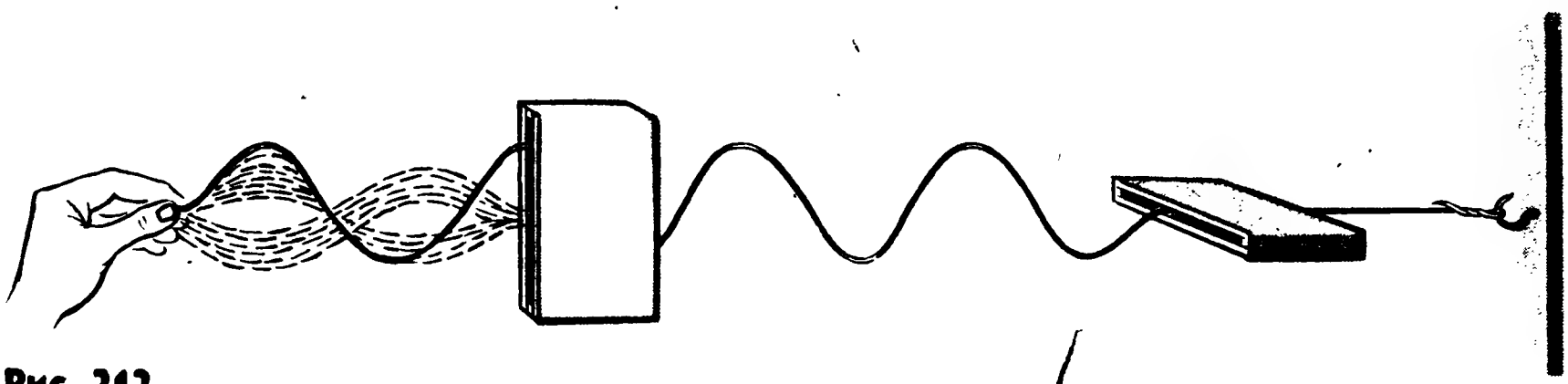


Рис. 212

Световая волна с колебаниями по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения, называется *естественной.* Такое название оправдано, так как в обычных условиях источники света создают именно такую волну. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, так как падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она является поперечной).

Второе предположение, которое необходимо сделать, относится к кристаллу. **Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, лежащими в одной определенной плоскости** (плоскость *P* на рисунке 211). Такой свет называется *поляризованным* или, точнее, *плоскополяризованным,* в отличие от естественного света, который может быть назван также *неполяризованным.* Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещенных кристаллах (угол между осями 90°) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси составляют между собой некоторый угол, отличный от 90°, то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина поляризует свет, т. е. преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

Нетрудно построить простую наглядную механическую модель рассматриваемого явления. Можно создать поперечную волну в резиновом шнуре так, чтобы колебания быстро меняли свое направление в пространстве. Это аналог естественной световой волны. Пропустим теперь шнур сквозь узкий деревянный ящик (рис. 212). Из колебаний всевозможных направлений ящик «выделяет» колебания в одной определенной плоскости. Поэтому из ящика выходит поляризованная волна.

Если на ее пути имеется еще точно такой же ящик, но повернутый относительно первого на 90°, то колебания сквозь него не проходят. Волна целиком гасится.

Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые *полароиды.* Поляроид представляет собой тонкую (0,1 мм) пленку кристаллов герапатита, нанесенную на целлулоид или стек-

лянную пластинку. С поляроидом можно проделать те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляроидов в том, что можно создавать большие поверхности, поляризующие свет. К недостаткам поляроидов относится фиолетовый оттенок, который они придают белому свету.

Уже давно обсуждается вопрос об установке поляроидов на фары и ветровые стекла автомобилей для устранения слепящего действия фар встречных машин. Для этого поляроид на фарах и ветровом стекле должен пропускать колебания под углом 45° к горизонту. Тогда направление световых колебаний встречной машины будет перпендикулярно плоскости, в которой поляроид пропускает колебания, свет фар будет гаситься. Собственный же поляризованный свет данного автомобиля после отражения от дороги будет проходить сквозь ветровое стекло. Установка поляроидов имеет смысл, если снабдить ими все автомобили.

§ 91. ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Поперечность электромагнитных волн непосредственно вытекает из теории Максвелла. К тому времени, когда Максвелл сделал вывод о существовании электромагнитных волн, поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл справедливо считал поперечность электромагнитных волн одним из важнейших доказательств справедливости электромагнитной теории света.

С признанием электромагнитной теории света исчезли все затруднения, связанные с необходимостью введения гипотетической среды — эфира, который приходилось рассматривать как твердое тело. Световые волны — это не механические волны в особой всепроникающей среде — эфире, а волны электромагнитные. Электромагнитные же процессы подчиняются не законам механики, а своим собственным законам.

В электромагнитной волне векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу (см. гл. V). В естественном свете колебания напряженности электрического поля $\vec{E}$ и магнитной индукции $\vec{B}$ происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волны. Если свет поляризован, то колебания как $\vec{E}$, так и $\vec{B}$ происходят не по всем направлениям, а в двух определенных плоскостях. Электромагнитная волна, изображенная на рисунке 104, является поляризованной.

Возникает естественный вопрос: когда шла речь о направлении колебаний в световой волне, то, собственно говоря, колебания какого вектора — $\vec{E}$ или $\vec{B}$ — имелись в виду? Специально поставленные опыты доказали, что на сетчатку глаза или фотоэмульсию действует именно электрическое поле световой волны.

Это понятно: сила, действующая на заряженную частицу со стороны электрического поля волны, превосходит силу, действующую со стороны магнитного поля, в $\frac{c}{v}$ раз (где v — скорость движения заряженной частицы, а c — скорость света). Так как электроны в атомах движутся со скоростью примерно в сто раз меньшей скорости света, то электрическая сила значительно больше магнитной.

?

1. Почему с помощью микроскопа нельзя увидеть атом?
2. Сформулируйте принцип Гюйгенса — Френеля.
3. Зависит ли положение главных максимумов дифракционной решетки от числа щелей?
4. Чем отличается естественный свет от поляризованного?
5. В каких случаях приближенно справедливы законы геометрической оптики?

УПРАЖНЕНИЕ 10

1. На рисунке 213 представлена схема опыта Майкельсона по определению скорости света. Какое число оборотов в секунду должна совершать восьмигранная зеркальная призма, чтобы источник был виден в зрительную трубу, если световой луч проходит расстояние, равное приблизительно 71 км?

2. Показатель преломления воды для красного цвета с длиной волны в вакууме $\lambda_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ см равен $n_1 = 1{,}331$, а для фиолетового с длиной волны в вакууме $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-5}$ см он равен $n_2 = 1{,}343$. Найти длины этих волн в воде и скорости их распространения.

3. Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см. Источники находятся друг от друга на расстоянии $d = 0{,}3$ см. Экран расположен на расстоянии 9 м от источника S_1. Что будет наблюдаться в точке A экрана (рис. 214): светлое пятно или темное?

4. На дифракционную решетку, имеющую период $d = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ см, нормально падает монохроматическая волна. Оценить длину волны λ, если угол между спектрами второго и третьего порядка $\Delta\varphi = 2°30'$.

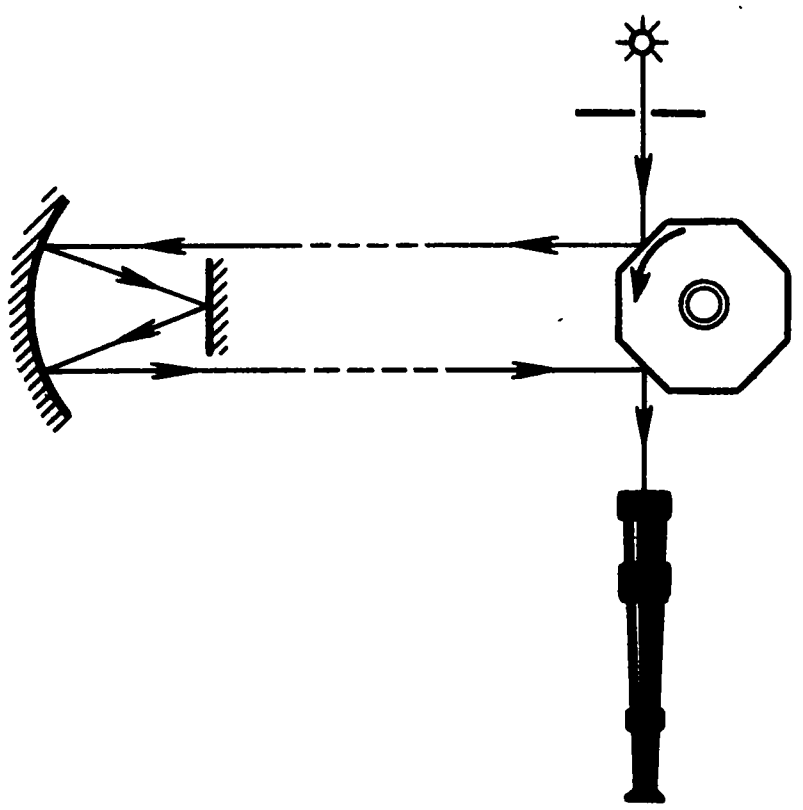


Рис. 213

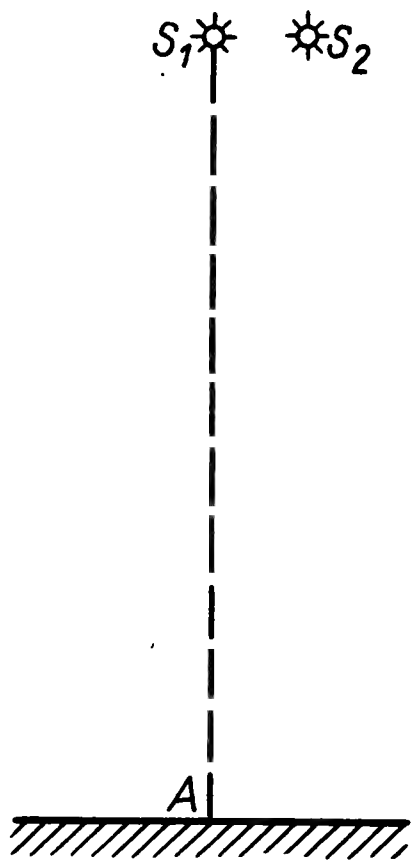


Рис. 214

Глава VIII

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

§ 92. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ И ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Развитие электродинамики и оптики привело к пересмотру представлений о пространстве и времени.

Согласно классическим представлениям о пространстве и времени, считавшимся на протяжении веков незыблемыми, движение не оказывает никакого влияния на течение времени (время абсолютно), а линейные размеры любого тела не зависят от того, покоится ли тело или движется (длина абсолютна).

Специальная теория относительности Эйнштейна — это новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену старым (классическим) представлениям.

После того как во второй половине XIX века Максвеллом были сформулированы основные законы электродинамики, возник вопрос, распространяется ли принцип относительности, справедливый для механических явлений, и на электромагнитные явления. Иными словами, протекают ли электромагнитные процессы (взаимодействие зарядов и токов, распространение электромагнитных волн и т. д.) одинаково во всех инерциальных системах отсчета? Или, быть может, равномерное прямолинейное движение, не влияя на механические явления, оказывает некоторое воздействие на электромагнитные процессы?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно было выяснить, меняются ли основные законы электродинамики при переходе от одной инерциальной системы к другой или же, подобно законам Ньютона, они остаются неизменными. Только в последнем случае можно отбросить сомнения в справедливости принципа относительности применительно к электромагнитным процессам и рассматривать этот принцип как общий закон природы.

Законы электродинамики сложны, и строгое решение этой задачи — нелегкое дело. Однако уже простые соображения, казалось бы, позволяют найти правильный ответ. Согласно законам электродинамики скорость распространения электромагнитных волн в вакууме одинакова по всем направлениям и равна $\vec{c}=3\cdot10^{10}$ см/с. Но, с другой стороны, в соответствии с законом сложения скоростей механики Ньютона скорость может равняться c только в одной избранной системе отсчета. В любой другой системе отсчета, движущейся по отношению к этой избранной системе со скоростью $\vec{v}$, скорость света должна уже равняться $\vec{c}-\vec{v}$. Это означает, что если справедлив обычный закон

сложения скоростей, то при переходе от одной инерциальной системы к другой законы электродинамики должны меняться так, чтобы в этой новой системе отсчета скорость света уже равнялась не $\vec{c}$, а $\vec{c} - \vec{v}$.

Таким образом, обнаружились определенные противоречия между электродинамикой и механикой Ньютона, законы которой согласуются с принципом относительности. Возникшие трудности можно было пытаться преодолеть тремя различными способами.

Первая возможность состояла в том, чтобы объявить несостоятельным принцип относительности в применении к электромагнитным явлениям. На эту точку зрения стал великий голландский физик, основатель электронной теории Г. Лоренц. Электромагнитные явления еще со времен Фарадея рассматривались как процессы в особой, всепроникающей среде, заполняющей все пространство, — «мировом эфире». Инерциальная система отсчета, покоящаяся относительно эфира,— это, согласно Лоренцу, особая преимущественная система. В ней законы электродинамики Максвелла справедливы и имеют наиболее простую форму. Лишь в этой системе отсчета скорость света в вакууме одинакова по всем направлениям.

Вторая возможность состоит в том, чтобы считать неправильными сами законы Максвелла и пытаться изменить их таким образом, чтобы они при переходе от одной инерциальной системы к другой (в соответствии с обычными, классическими представлениями о пространстве и времени) не менялись. Такая попытка, в частности, была предпринята Г. Герцем. По Герцу, эфир полностью увлекается движущимися телами, и поэтому электромагнитные явления, разыгрывающиеся в эфире, протекают одинаково, независимо от того, покоится тело или движется. Принцип относительности справедлив.

Наконец, третья возможность разрешения указанных трудностей состоит в отказе от классических представлений о пространстве и времени, с тем чтобы сохранить как принцип относительности, так и законы Максвелла. Это наиболее революционный путь, ибо он означает пересмотр самых глубоких, самых основных представлений в физике. С данной точки зрения оказываются неточными не уравнения электромагнитного поля, а законы механики Ньютона, согласующиеся со старыми представлениями о пространстве и времени. Изменять нужно законы механики, а не законы электродинамики Максвелла.

Единственно правильной оказалась именно третья возможность. Последовательно развивая ее, Эйнштейн пришел к новым представлениям о пространстве и времени. Первые два пути, как оказалось, опровергаются экспериментом.

При попытках Герца изменить законы электродинамики Максвелла выяснилось, что новые уравнения не способны объяснить ряд наблюдаемых фактов. Так, согласно теории Герца,

движущаяся вода должна полностью увлекать за собой распространяющийся в ней свет, так как она увлекает эфир, в котором свет распространяется. Опыт же показал, что в действительности это не так.

Точка зрения Лоренца, согласно которой должна существовать избранная система отсчета, связанная с мировым эфиром, пребывающим в абсолютном покое, также была опровергнута прямыми опытами.

§ 93. ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА

Если бы скорость света была равна 300 000 км/с только в системе отсчета, связанной с эфиром, то, измеряя скорость света в произвольной инерциальной системе, можно было бы обнаружить движение этой системы по отношению к эфиру и определить скорость этого движения. Подобно тому как в системе отсчета, движущейся относительно воздуха, возникает ветер, при движении по отношению к эфиру (если, конечно, эфир существует) должен быть обнаружен «эфирный ветер». Опыт по обнаружению «эфирного ветра» был поставлен в 1881 г. американскими учеными А. Майкельсоном и Э. Морли по идее, высказанной за 12 лет до этого Максвеллом. Суть этого опыта можно понять с помощью следующего примера.

Из города A самолет совершает рейсы в города B и C (рис. 215, $а$). Расстояния между городами одинаковы и равны $l=300$ км, причем трасса AB перпендикулярна трассе AC. Скорость самолета относительно воздуха $c=200$ км/ч. Пусть в направлении AB дует ветер со скоростью $v=10$ км/ч. Спрашивается: какой рейс займет больше времени: от A к B и обратно или от A к C и обратно? В первом случае время полета равно

$$t_1 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} \approx 3{,}0075 \text{ ч.}$$

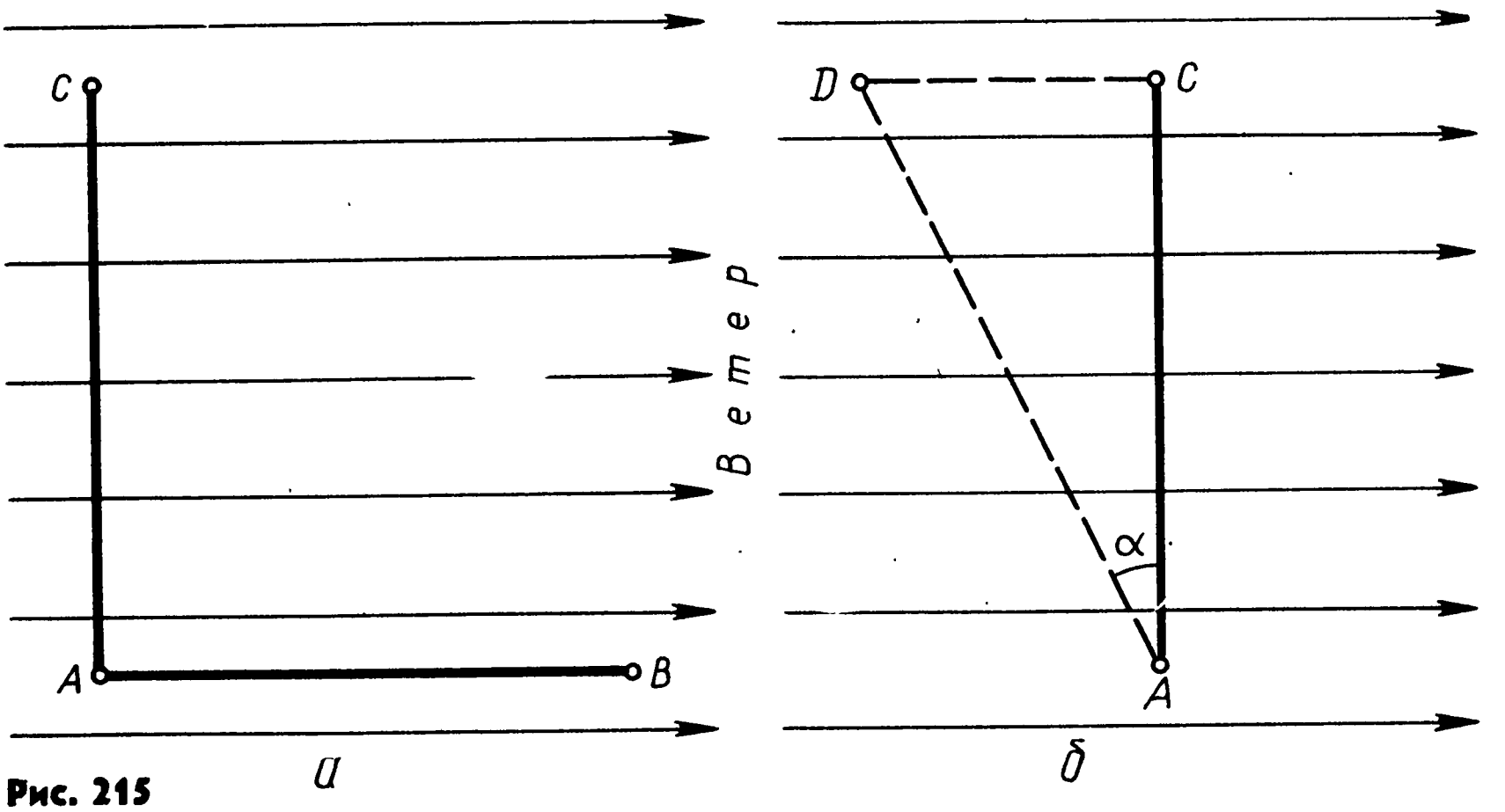


Рис. 215

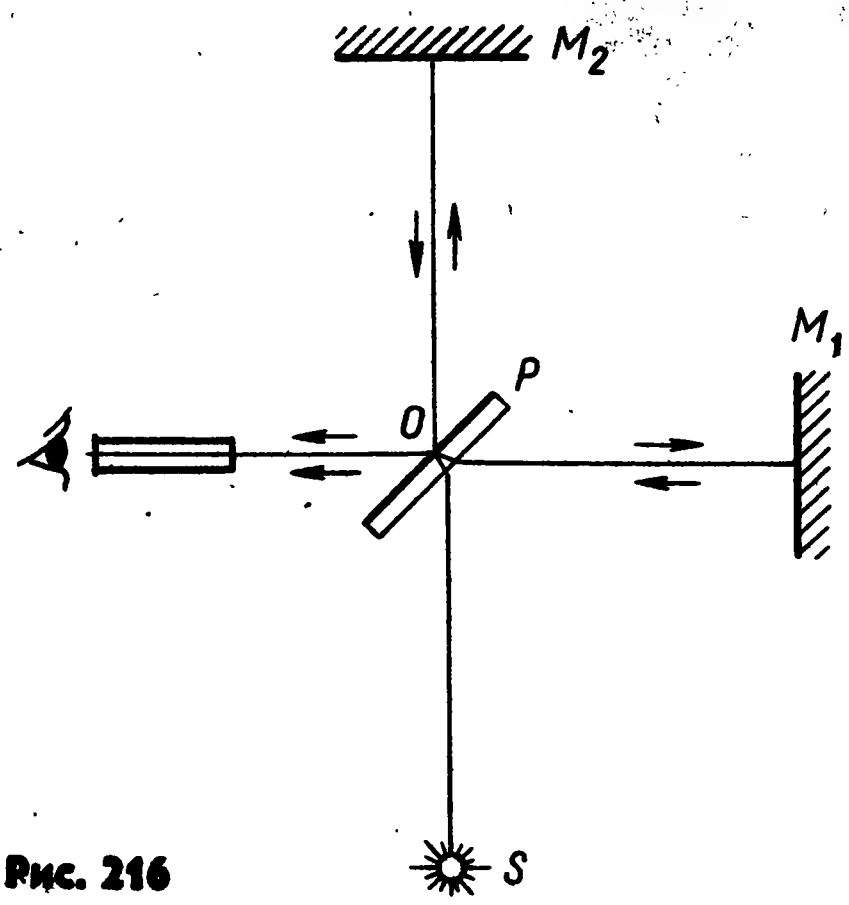


Рис. 216

Во втором случае самолет должен держать курс не на сам город C, а на некоторую точку D, лежащую против ветра (рис. 215, *б*). Относительно воздуха самолет пролетит расстояние $|AD|$. Воздушный поток сносит самолет на расстояние $|DC|$. Отношение этих расстояний равно отношению скоростей:

$$\frac{|DC|}{|AD|} = \frac{v}{c}.$$

Относительно Земли самолет пролетит расстояние $|AC|$.

Так как $\frac{|DC|}{|AD|} = \sin\alpha$ (см. рис. 215, *б*), то $\sin\alpha = \frac{v}{c}$. Но

$$|AD| = \frac{|AC|}{\cos\alpha} = \frac{|AC|}{\sqrt{1-\sin^2\alpha}}.$$

Поэтому

$$|AD| = \frac{|AC|}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Следовательно, время t_2, затраченное самолетом на прохождение этого пути туда и обратно со скоростью c, определится так:

$$t_2 = \frac{2|AD|}{c} = \frac{2|AC|}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2|AC|}{\sqrt{c^2-v^2}} \approx 3{,}00375 \text{ ч.}$$

Разность времени налицо. Зная ее, а также расстояние $|AC|$ и скорость c, можно определить скорость ветра относительно Земли.

Упрощенная схема опыта Майкельсона приведена на рисунке 216. В этом опыте роль самолета играла световая волна, имеющая скорость 300 000 км/с относительно эфира. (Никаких сомнений в существовании эфира тогда не было.) Роль обычного ветра играл предполагаемый «эфирный ветер», обдувающий Землю. Относительно неподвижного эфира Земля не может покоиться все время, так как она движется вокруг Солнца со скоростью около 30 км/с и эта скорость непрерывно меняет направление. Роль города A играла полупрозрачная пластина P, разделяющая поток света от источника S на два взаимно перпендикулярных пучка. Города B и C заменены зеркалами M_1 и M_2, направляющими световые пучки обратно.

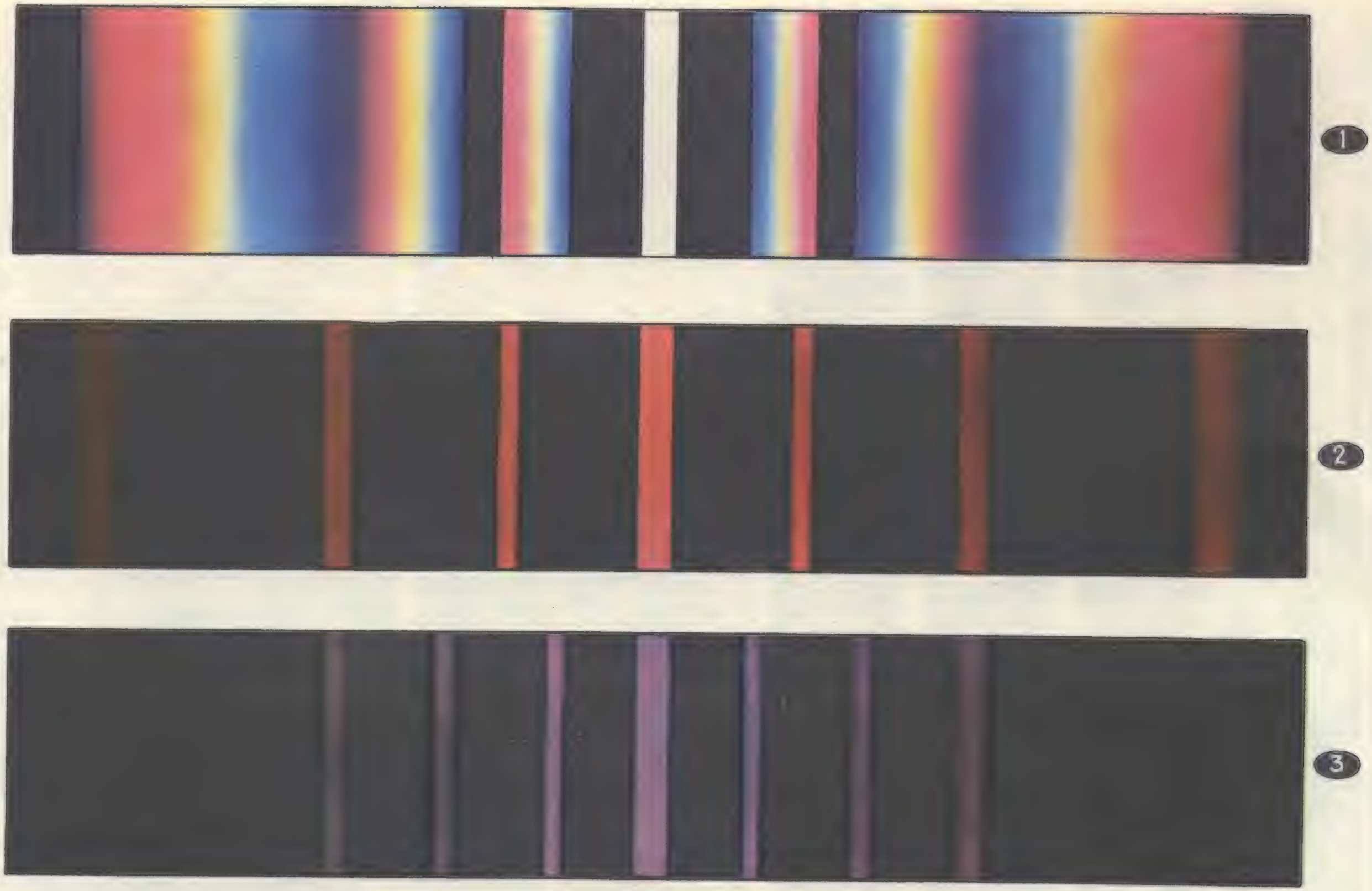


Рис. IV. Спектры, полученные с помощью дифракционной решетки: 1 — для белого света; 2 — для монохроматического красного света; 3 — для монохроматического фиолетового света.

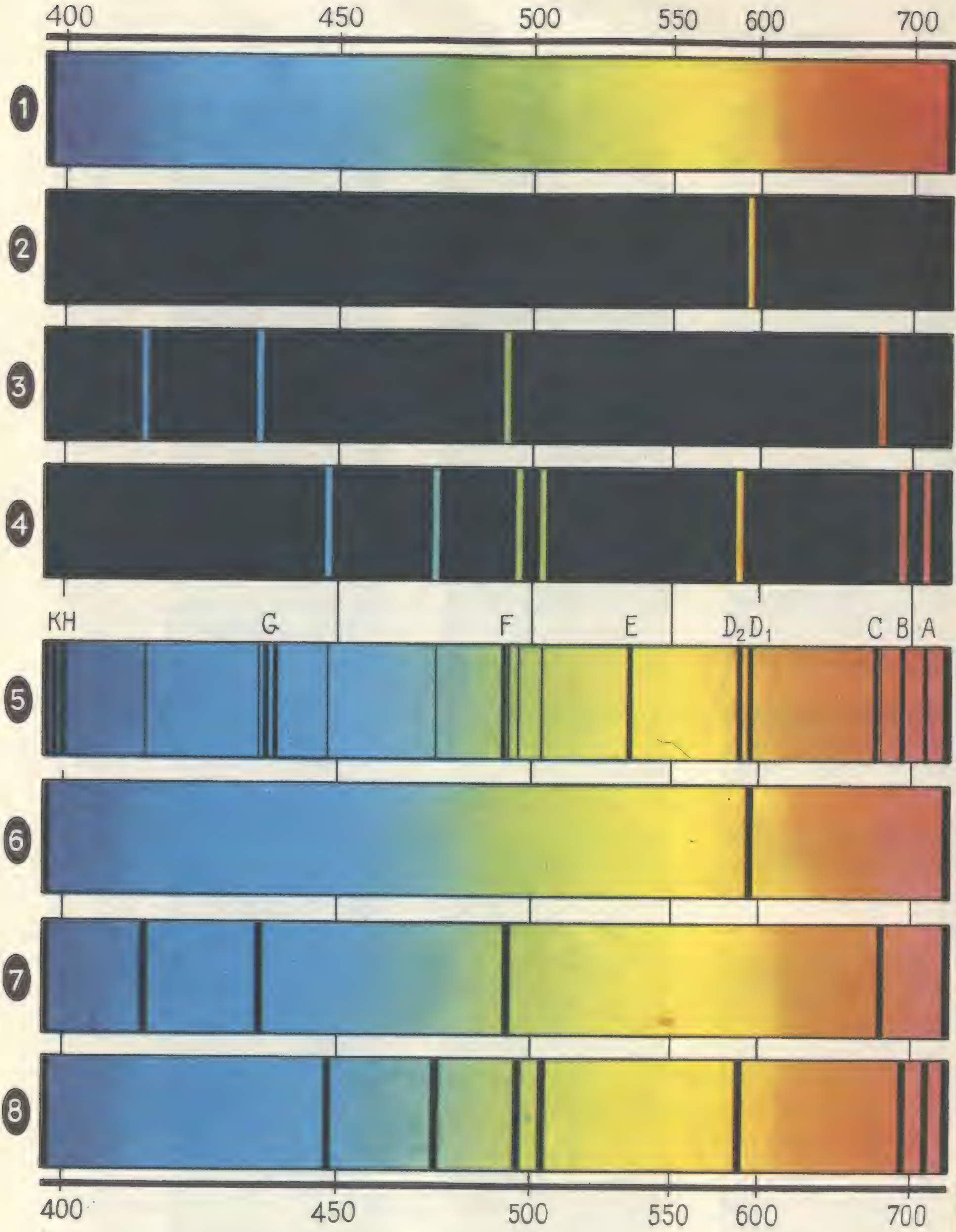


Рис. V. Спектры испускания: **1** — сплошной; **2** — натрия; **3** —водорода; **4** —гелия. Спектры поглощения; **5** — солнечный; **6** — натрия; **7** — водорода; **8** — гелия.

Далее оба пучка света соединялись и попадали в объектив зрительной трубы. При этом возникала интерференционная картина, состоящая из чередующихся светлых и темных полос (рис. 217). Расположение полос зависело от разности времен, затрачиваемых светом на одном и другом пути.

Весь прибор был установлен на квадратной каменной плите со сторонами по 1,5 м и толщиной более 30 см. Плита плавала в чаше со ртутью, для того чтобы ее можно было без сотрясения поворачивать вокруг вертикальной оси (рис. 218).

Направление «эфирного ветра» неизвестно. Но при вращении прибора ориентация световых путей OM_1 и OM_2 относительно «эфирного ветра» должна была изменяться. Следовательно, должна была изменяться разность времен прохождения путей OM_1 и OM_2, а поэтому должны были смещаться и интерференционные полосы в поле зрения трубы. По этому смещению надеялись определить скорость «эфирного ветра» и его направление.

Однако, к удивлению ученых, опыт показал, что никакого смещения интерференционных полос при повороте прибора не происходит. Эксперименты ставились в разное время суток и различные времена года, но всегда с одним и тем же отрицательным результатом: движения Земли по отношению к эфиру обнаружить не удалось. Точность последних экспериментов была такова, что они позволили бы обнаружить изменение величины скорости распространения света (при повороте интерферометра) даже на 2 м/с.

Все это было похоже на то, как если бы вы, высунув голову из окна машины, при скорости 100 км/ч не заметили бы встречного ветра.

Таким образом, идея о существовании преимущественной системы отсчета не выдержала опытной проверки. В свою очередь это означало, что никакой особой среды — «светоносного эфира», — с которой можно было бы связать такую преимущественную систему отсчета, не существует.

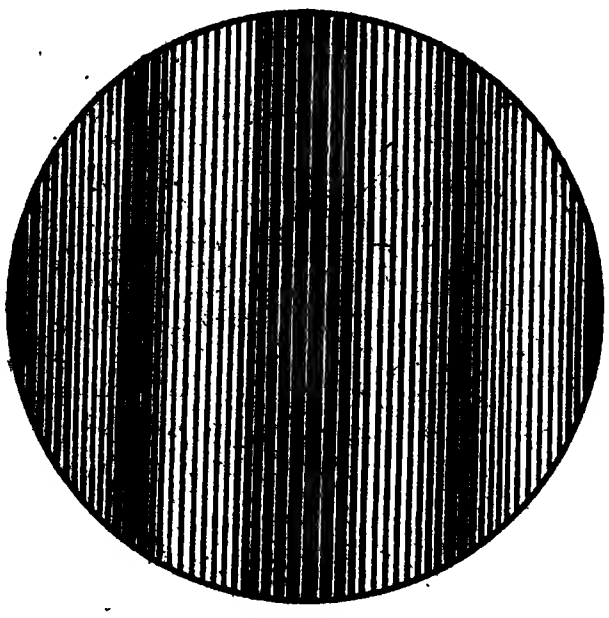


Рис. 217

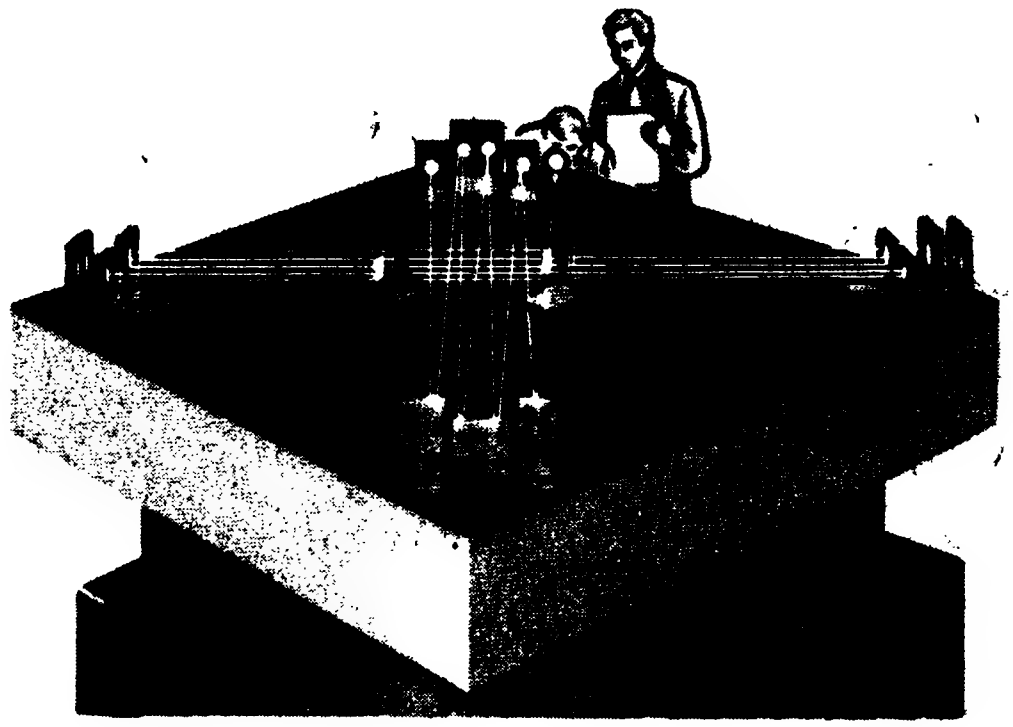


Рис. 218

§ 94. ПОСТУЛАТЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ [1]

Для объяснения отрицательных результатов опыта Майкельсона и других опытов, которые должны были обнаружить движение Земли относительно эфира, вводились различные гипотезы, единственной целью которых было объяснение отрицательных результатов экспериментов по обнаружению преимущественной системы отсчета (считали, что такая система в действительности якобы имеется). Так, в частности, для объяснения опыта Майкельсона высказывали гипотезу о сокращении линейных размеров всех тел при их движении относительно эфира.

Совсем по-иному подошел к проблеме Эйнштейн: не следует изобретать различные гипотезы для объяснения отрицательных результатов всех попыток обнаружить различие между инерциальными системами. Законом природы является полное равноправие всех инерциальных систем отсчета в отношении не только механических, но и электромагнитных процессов. Нет никакого различия между состоянием покоя и равномерного прямолинейного движения. Именно это обнаружилось в опыте Майкельсона (движение Земли по орбите не оказывает влияния на оптические явления на Земле).

Принцип относительности — главный постулат теории Эйнштейна. Его можно сформулировать так: **все процессы природы протекают одинаково в любой инерциальной системе отсчета.**

Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы в природе, в том числе и на электромагнитные.

Но теория относительности основывается не только на принципе относительности. Имеется еще второй постулат: **скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала** [2].

Скорость света занимает, таким образом, особое положение. Для того чтобы решиться сформулировать постулаты теории относительности, нужна была большая научная смелость. Дело в том, что они находятся в очевидном противоречии с классическими представлениями о пространстве и времени.

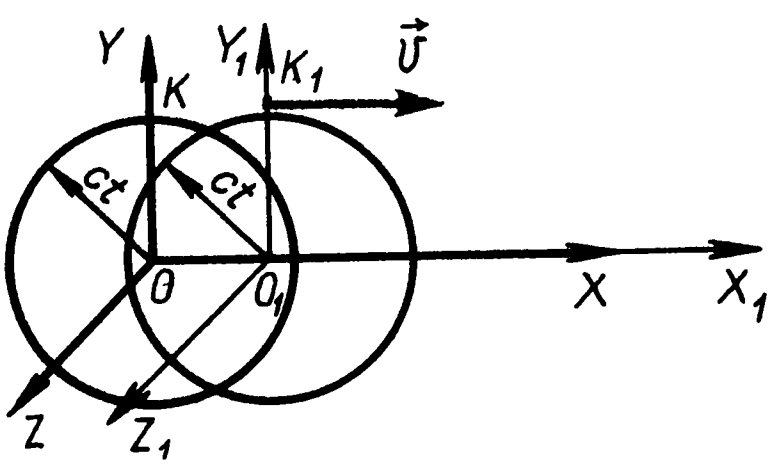


Рис. 219

[1] *Постулат* в физической теории играет ту же роль, что и *аксиома* в математике. Это основное положение, которое не может быть логически доказано. В физике постулат есть результат обобщения опытных фактов.

[2] Этот постулат можно рассматривать как следствие утверждения о независимости скорости света от движения источника и принципа относительности.

Альберт Эйнштейн (1879—1955) — **великий физик XX века. Им создано новое учение о пространстве и времени — специальная теория относительности. Обобщая эту теорию на случай неинерциальных систем отсчета, Эйиштейн построил общую теорию относительности, представляющую собой современную теорию тяготения.**

Эйнштейн впервые ввел представление о частицах света — фотоиах. Работа Эйнштейна по теории броуновского движения привела к окончательной победе молекулярно-кинетической теории строения вещества.

Человечество с глубоким уважением относится к прогрессивной общественной деятельности Эйнштейна, неоднократио выступавшего против войны.

В самом деле, допустим, что в момент времени, когда начала координат инерциальных систем отсчета K и K_1 (рис. 219), движущихся друг относительно друга со скоростью v, совпадают, в начале координат произошла кратковременная вспышка света. За время t системы сместятся друг относительно друга на расстояние vt, а сферический волновой фронт будет иметь радиус ct. Системы K и K_1 равноправны, и скорость света одинакова в той и другой системе. Следовательно, с точки зрения наблюдателя, связанного с системой отсчета K, центр сферы будет находиться в точке O, а с точки зрения наблюдателя, связанного с системой отсчета K_1, он будет находиться в точке O_1. Но ведь не может один и тот же сферический фронт иметь центры в O и O_1! Это явное противоречие вытекает из рассуждений, основанных на постулатах теории относительности.

Противоречие здесь действительно есть. Но не внутри самой теории относительности. Имеется лишь противоречие с классическими представлениями о пространстве и времени, которые при больших скоростях движения уже несправедливы.

§ 95. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

Причиной несостоятельности класснческих представлений о пространстве и времени является неправильное предположение о возможности мгновенной передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую. Существование предельной конечной скорости передачи взаимодействий вызывает необходимость глубокого изменения обычных представлений о пространстве и времени, основанных на повседневном опыте. Представление об *абсолютном времени,* которое течет раз и навсегда заданным темпом, совершенно независимо от материи и ее движения, оказывается неправильным.

Если допустить мгновенное распространение сигналов, то утверждение, что события в двух пространственно разделенных точках A и B произошли одновременно, будет иметь абсолютный

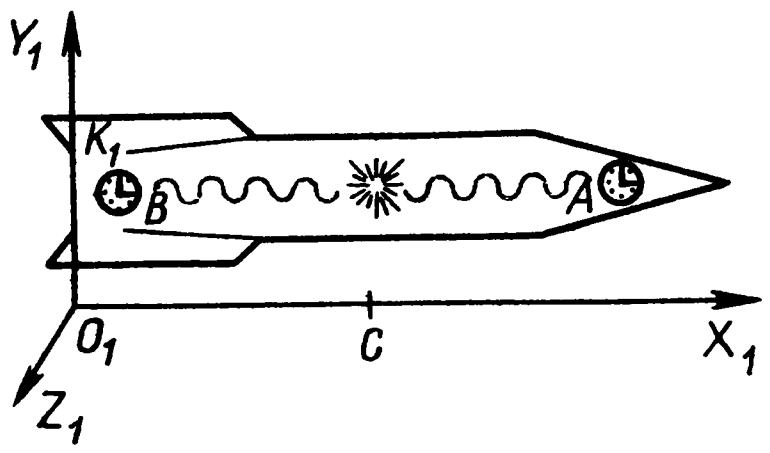


Рис. 220

смысл. Можно поместить в точки A и B часы и синхронизировать их с помощью мгновенных сигналов. Если такой сигнал отправлен из A, например, в 0 ч 45 мин и он в этот же момент времени по часам B пришел в точку B, то, значит, часы показывают одинаковое время, т. е. идут *синхронно*. Если же такого совпадения нет, то часы можно *синхронизировать*, подведя вперед те часы, которые показывают меньшее время в момент отправления сигнала.

Любые события, например два удара молнии, одновременны, если они происходят при одинаковых показаниях синхронизированных часов.

Только располагая в точках A и B синхронизированными часами, можно судить о том, произошли ли два каких-либо события в этих точках одновременно или нет. Но как можно синхронизировать часы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, если скорость распространения сигналов не бесконечно велика?

Для синхронизации часов естественно прибегнуть к световым или вообще электромагнитным сигналам, так как скорость электромагнитных волн в вакууме является строго определенной, постоянной величиной.

Именно этот способ используют для проверки часов по радио. Сигналы времени позволяют синхронизировать ваши часы с точными эталонными часами. Зная расстояние от радиостанции до дома, можно вычислить поправку на запаздывание сигнала. Эта поправка, конечно, очень невелика. В повседневной жизни она не играет сколько-нибудь существенной роли. Но при огромных космических расстояниях она может оказаться весьма существенной.

Рассмотрим подробнее простой метод синхронизации часов, не требующий никаких вычислений. Допустим, что космонавт хочет узнать, одинаково ли идут часы A и B, установленные на противоположных концах космического корабля (рис. 220). Для этого с помощью источника, неподвижного относительно корабля и расположенного в его середине, космонавт производит вспышку света. Свет одновременно достигает обоих часов. Если показания часов в этот момент одинаковы, то часы идут синхронно.

Но так будет лишь относительно системы отсчета K_1, связанной с кораблем. В системе же отсчета K, относительно которой корабль движется, положение иное. Часы на носу корабля удаляются от того места, где произошла вспышка света источника, и, чтобы достигнуть часов A, свет должен преодолеть расстояние, большее половины длины корабля (рис. 221, *а* и 221, *б*). Напро-

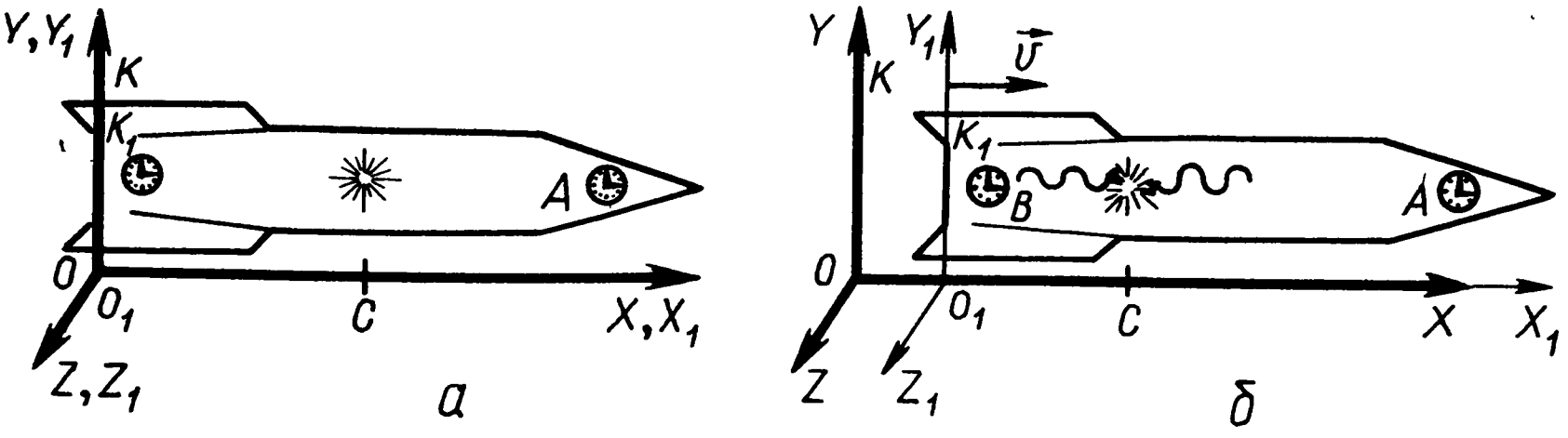


Рис. 221

тив, часы B на корме приближаются к месту вспышки, и путь светового сигнала меньше половины длины корабля. Поэтому наблюдатель в системе K придет к выводу, что сигналы достигают обоих часов неодновременно. Соответственно часы A и B идут неодинаково.

Два любых события в точках A и B, одновременные в системе K_1, неодновременны в системе K. Но в силу принципа относительности системы K_1 и K совершенно равноправны. Ни одной из этих систем нельзя отдать предпочтение. Поэтому мы вынуждены прийти к заключению, что **одновременность пространственно разделенных событий относительна.** Причиной относительности одновременности является, как мы видим, конечность скорости распространения сигналов.

Именно в относительности одновременности кроется решение парадокса со сферическими световыми сигналами, о котором шла речь в § 94. Свет одновременно достигает точек сферической поверхности с центром в точке O только с точки зрения наблюдателя, находящегося в покое относительно системы K. С точки зрения же наблюдателя, связанного с системой K_1, свет достигает этих точек в разные моменты времени.

Разумеется, справедливо и обратное: в системе K свет достигает точек поверхности сферы с центром в O_1 в различные моменты времени, а не одновременно, как это представляется наблюдателю в системе K_1.

Отсюда следует, что никакого парадокса в действительности нет.

§ 96. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ПРОМЕЖУТКОВ ВРЕМЕНИ

Согласно теории относительности промежутки времени не являются абсолютными. Пусть в одной и той же точке системы отсчета K_1, движущейся относительно системы отсчета K, происходят два события, разделенные интервалом времени τ_0. Например, это могут быть два последовательных удара метронома, отбивающего каждую секунду. Система отсчета K_1 является для данных событий «системой покоя», т. е. системой отсчета, относительно которой события происходят в одной точке. Интервал времени τ между этими же событиями, измеренный по часам

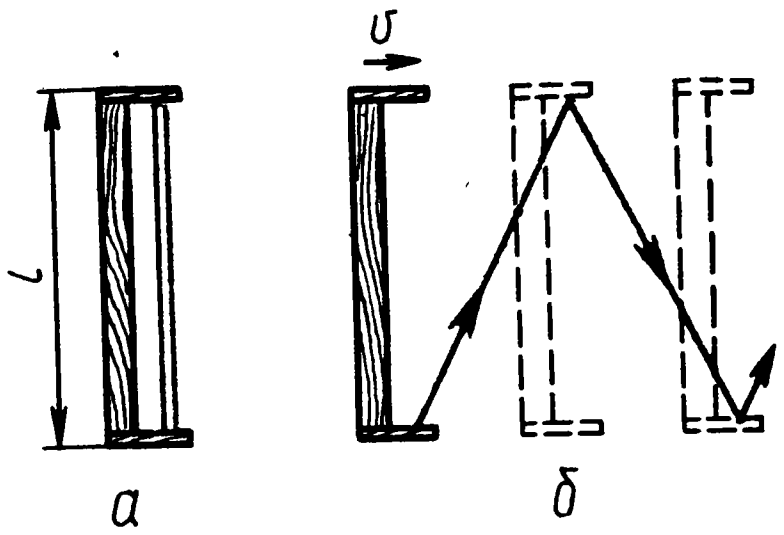


Рис. 222

системы отсчета K, относительно которой события «движутся», т. е. происходят в разных точках, согласно теории относительности больше τ_0:

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (8.1)$$

Справедливость этого результата можно пояснить с помощью простых «световых часов», устроенных следующим образом. На концах стержня длиной l закреплены два параллельных зеркала. Между зеркалами движется вверх и вниз световой импульс (рис. 222, *а*). Каждое отражение от нижнего зеркала с помощью особого устройства вызывает очередное «тиканье» часов. Наблюдатель, неподвижный относительно часов, обнаружит, что интервал времени между «тиканьями» равен

$$\tau_0 = \frac{2l}{c}.$$

Но с точки зрения наблюдателя, относительно которого часы движутся со скоростью $\vec{v}$, интервал времени окажется другим. Будем считать, что стержень перпендикулярен скорости $\vec{v}$. Тогда свет в движущихся часах распространяется вдоль ломаной линии (рис. 222, *б*) и проходит между «тиканьями» часов за время τ путь

$$2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}.$$

Следовательно,

$$\tau = \frac{2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}}{c},$$

Решая это уравнение относительно τ и учитывая, что $\frac{2l}{c} = \tau_0$, приходим к формуле (8.1).

Время, измеренное по часам системы отсчета, в которой события происходят в одной точке, называется *собственным временем*. Оно минимально, и этот факт имеет абсолютное значение. Если собственное время равно, например, 5 с, то все движущиеся наблюдатели по своим часам отметят большие промежутки: 6, 10 с и т. д. в зависимости от скорости относительного движения. Этот эффект называется *замедлением времени в движущихся системах*. Равноправие систем отсчета K и K_1 состоит в том, что если события происходят в одной и той же точке системы K, то промежуток между событиями будет минимален по часам этой системы. Промежуток времени не является абсолютной величиной, а зависит от системы отсчета:

Явление замедления времени обнаружено экспериментально при наблюдении распада элемеитарных частиц, живущих короткое время. Время жиз-

ни, например, заряженного π-мезона (пиона [1]), т. е. время между рождением мезоиа и его распадом, в системе покоя в среднем равно $\tau_0 = 2{,}6 \cdot 10^{-8}$ с. Чем быстрее движется мезон относительно лаборатории, тем больше время его жизни по часам, покоящимся в лаборатории. Так как скорости движения элементарных частиц могут быть очень близкими к скорости света, то увеличение времени жизни, определяемое формулой (8.1), обнаруживается на опыте. Оно может оказаться больше времени жизни покоящейся или медленно движущейся частицы в несколько раз. Причем увеличение времени жизни в зависимости от скорости v движения мезона относительно лаборатории в точности соответствует формуле (8.1). При скорости v, близкой к c, множитель

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}},$$

может равняться, например, 10 и мезон проходит до распада путь не $\tau_0 c = 7{,}8$ м, а в десять раз больший. Замечательно, что этот результат можно предсказать с помощью теории относительности, несмотря на то, что мы не знаем ни строения мезона, ни почему он вообще распадается. В этом огромная ценность теории относительности.

Вытекающие из теории относительности представления о том, что одновременность событий и интервалы времени не являются абсолютными, а зависят от скорости движения, кажутся противоречащими «здравому смыслу», т. е. повседневному опыту. Так и есть на самом деле. В повседневной жизни мы встречаемся только с движениями тел со скоростями, много меньшими скорости света, когда все релятивистские [2] эффекты практически незаметны. Мы привыкли к медленным движениям и лишены возможности представить себе наглядно в полной мере процессы при скоростях, близких к скорости света. Такие процессы непосредственно недоступны ни нашим органам чувств, ни нашему воображению. Лишь с помощью науки, опирающейся на мощь разума и использующей совершенные экспериментальные установки, удалось достигнуть знания законов природы при больших скоростях движения.

§ 97. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ РАССТОЯНИЙ

Пусть твердый стержень покоится в системе отсчета K_1, движущейся со скоростью v относительно системы отсчета K (рис. 223). Длина покоящегося стержня, т. е. длина, измеренная в системе K_1, равна l_0.

Под длиной l стержня в системе отсчета K, относительно которой стержень движется, понимают расстояние между концами стержня, зафиксированное о д н о в р е м е н н о (по часам э т о й системы).

---

[1] П и о н ы — элементарные частицы, масса которых имеет промежуточное значение между массой протона и массой электрона.

[2] Все эффекты, являющиеся следствием теории относительности, часто называют *релятивистскими*.

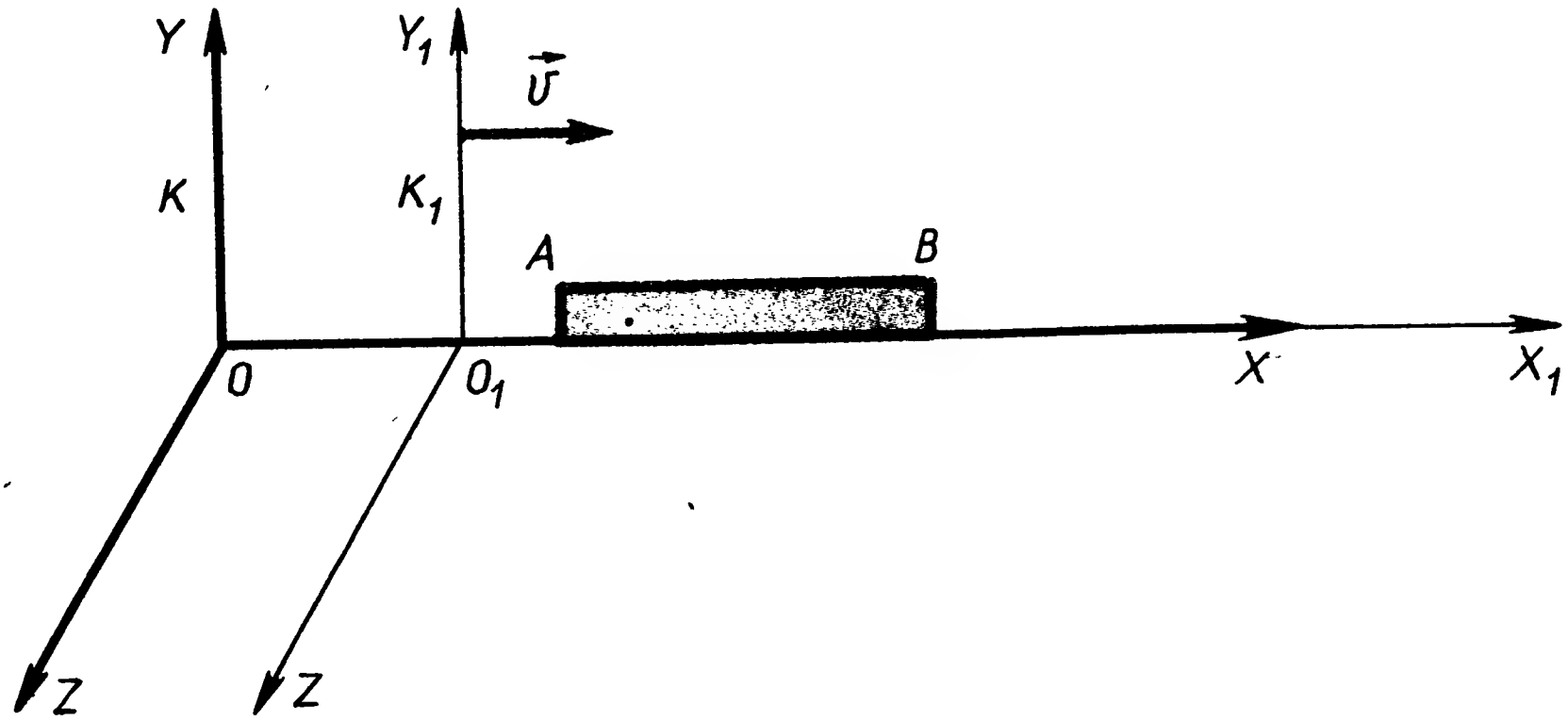


Рис. 223

Тогда согласно теории относительности имеет место формула:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (8.2)$$

Длина движущегося стержня оказывается меньше длины покоящегося стержня, так как

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1.$$

Относительность расстояний (в рассматриваемом случае — расстояния между концами стержня) непосредственно связана с постоянством скорости света во всех инерциальных системах отсчета и с относительностью промежутков времени.

Покажем это с помощью «световых часов», о которых говорилось в предыдущем параграфе; но теперь стержень расположен не перпендикулярно скорости относительного движения систем, а параллельно ей.

Световой импульс, испущенный с одного конца стержня *(A)*, отразится от зеркала на другом конце стержня *(B)* и вернется назад спустя интервал времени τ_0, измеренный по часам, покоящимся в системе отсчета K_1 (рис. 224). Длина l_0 покоящегося стержня связана с временем τ_0 соотношением:

$$c\tau_0 = 2l_0. \qquad (8.3)$$

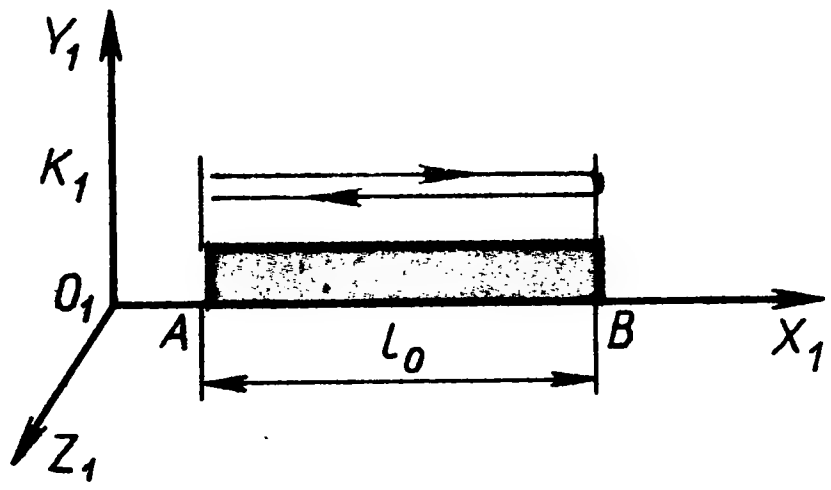


Рис. 224

Промежуток времени между этими же событиями (испусканием сигиала из точки A и возвращением его в эту точку после отражения от зеркала B), измеренный по часам, покоящимся в системе K, обозначим через τ. Интервалы τ_0 и τ связаны друг с другом формулой (8.1).

Если τ_1 — время движеиия светового сигнала от A к B и τ_2 — время движения сигнала в обратном направлении, то

$$\tau = \tau_1 + \tau_2.$$

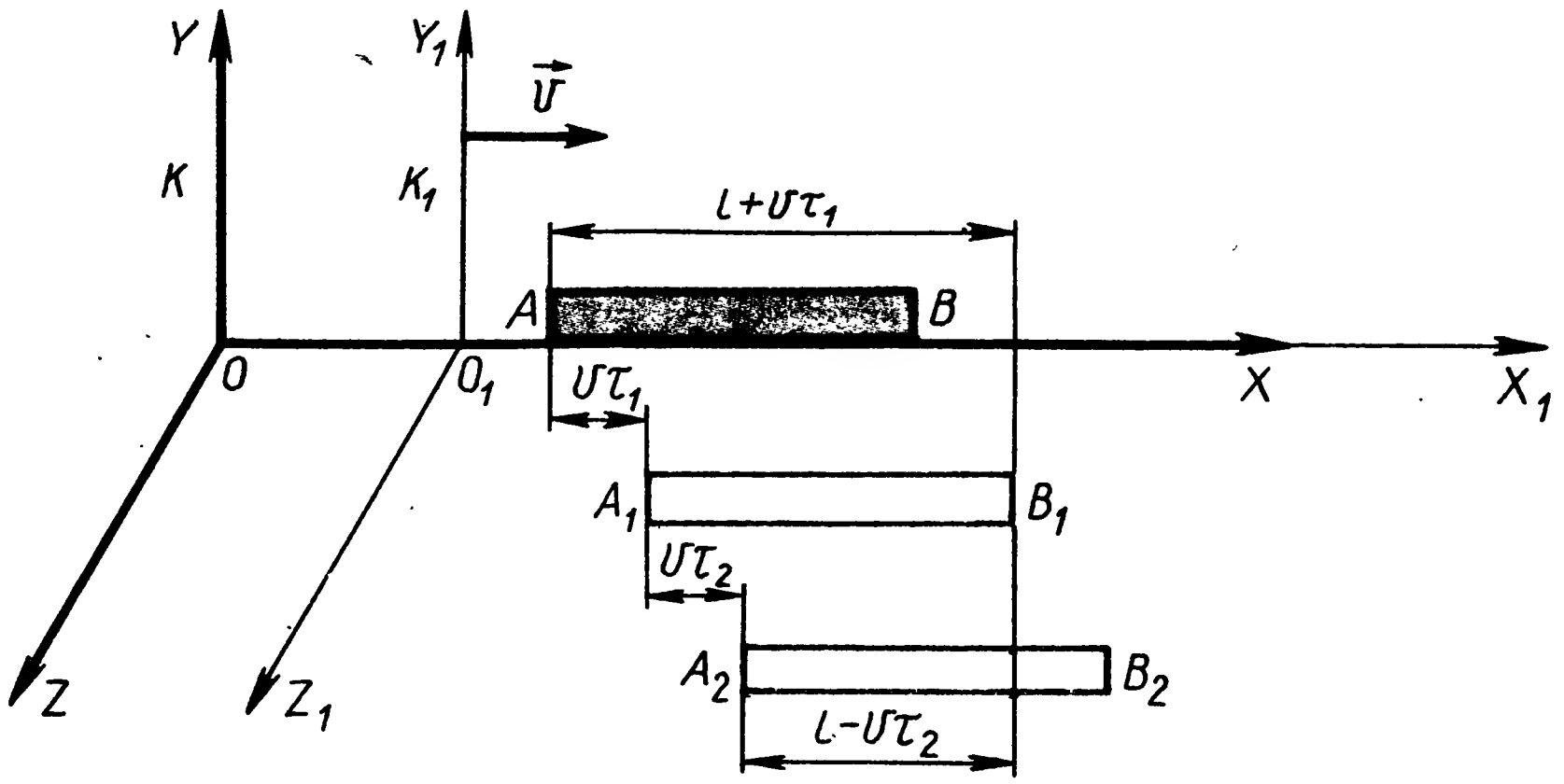


Рис. 225

На рисунке 225 показаны положения стержня относительно системы отсчета K в различные моменты времени: в момент вспышки света (положение AB), спустя время τ_1 (положение A_1B_1) и спустя время $\tau_1+\tau_2$ (положение A_2B_2) За время τ_1 стержень сместится относительно системы K на расстояние $v\tau_1$. Путь, проходимый световым импульсом при его движении от A к B, с точки зрения наблюдателя, связанного с системой K, равен $l+v\tau_1$ (где l — длина движущегося стержня). Поэтому можно записать следующее уравнение:

$$l+v\tau_1=c\tau_1.$$

Отсюда

$$\tau_1=\frac{l}{c-v}.$$

При движении светового импульса назад от B к A пройденный им путь в системе отсчета K равен $l-v\tau_2$, так как за время τ_2 точка A сместится на расстояние $v\tau_2$ навстречу световому импульсу. Поэтому

$$l-v\tau_2=c\tau_2.$$

Отсюда

$$\tau_2=\frac{l}{c+v}.$$

Полное время движения светового импульса по часам системы отсчета K равно:

$$\tau=\tau_1+\tau_2=\frac{2cl}{c^2-v^2}=\frac{2l}{c}\,\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (8.4)$$

Согласно же формулам (8.1) и (8.3)

$$\tau=\frac{\tau_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{2l_0}{c}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (8.5)$$

Приравнивая выражения (8.4) и (8.5), мы получим соотношение (8.2) между длинами неподвижного и движущегося стержня.

Расстояние не является абсолютной величиной, а зависит от скорости движения тела относительно данной системы отсчета.

Абсолютным является лишь утверждение о том, что покоящийся стержень длиннее движущегося. Если тот же стержень покоится в системе отсчета K, то его длина в этой системе отсчета равна l_0, а относительно системы отсчета K_1 длина стержня будет меньше в соответствии с формулой (8.2). Так и должно быть согласно принципу относительности.

Сокращение размеров обладает замечательным свойством взаимности.

Здесь, по словам английского ученого Эддингтона, обнаруживается противоречие со «здравым смыслом», идущее гораздо дальше того, что мы встречаем у Свифта. Гулливер смотрел на лилипутов как на карликов, а лилипуты смотрели на Гулливера как на великана. Это естественно. Но могло ли быть так, чтобы лилипуты казались карликами Гулливеру, а Гулливер казался карликом лилипутам? А ведь именно с аналогичной ситуацией мы сталкиваемся, рассматривая релятивистское сокращение длины.

§ 98. РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

Новым релятивистским представлением о пространстве и времени соответствует новый закон сложения скоростей. Очевидно, что классический закон сложения скоростей не может быть справедлив, так как он противоречит утверждению о постоянстве скорости света в вакууме.

Если поезд движется со скоростью v и в вагоне в направлении движения поезда распространяется световая волна, то ее скорость относительно Земли должна равняться опять-таки c, а не $v+c$. Новый закон сложения скоростей и должен приводить к требуемому результату.

Мы запишем (без доказательства) закон сложения скоростей для частного случая, когда тело движется вдоль оси X_1 системы отсчета K_1, которая в свою очередь движется со скоростью v относительно системы отсчета K. Причем в процессе движения координатные оси X и X_1 все время совпадают, а координатные оси Y и Y_1, Z и Z_1 остаются параллельными (рис. 226).

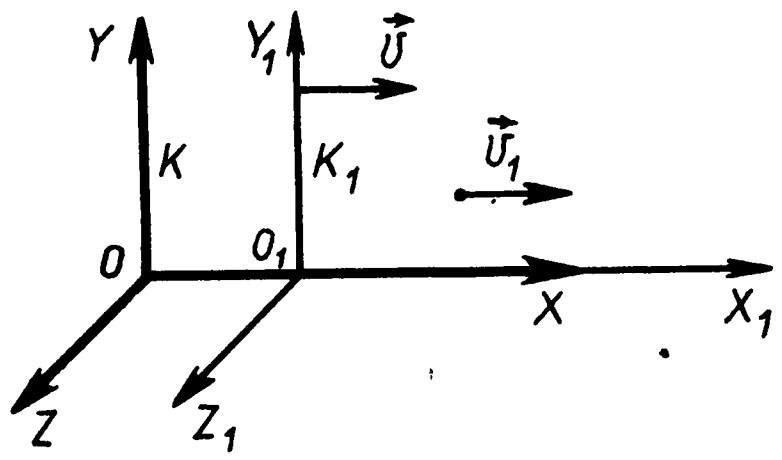


Рис. 226

Обозначим скорость тела относительно K_1 через v_1, а скорость этого же тела относительно K через v_2. Тогда согласно релятивистскому закону сложения скоростей

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}} \qquad (8.6)$$

Если $v \ll c$ и $v_1 \ll c$, то членом $\frac{v_1 v}{c^2}$ в знаменателе можно пренебречь и вместо (8.6) получим классический закон сложения скоростей:

$$v_2 = v_1 + v.$$

При $v_1 = c$ скорость v_2 также равна c, как этого требует второй постулат теории относительности. Действительно,

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c \frac{c + v}{c + v} = c.$$

Замечательным свойством релятивистского закона сложения скоростей является то, что при любых скоростях v_1 и v (конечно, не больших c) результирующая скорость v_2 не превышает c. В предельном случае при $v_1 = v = c$ получаем:

$$v_2 = \frac{2c}{2} = c.$$

Скорости $v > c$ невозможны. При $v > c$ формулы (8.1) и (8.2) теряют смысл, так как время и длина становятся мнимыми.

Скорость света является максимально возможной скоростью передачи взаимодействий в природе.

?

1. Какие утверждения лежат в основе теории относительности?
2. В чем отличие первого постулата теории относительности от принципа относительности в механике?
3. Какие события называются одновременными?
4. Что называется собственным временем?
5. Почему утверждение о том, что в движущихся системах отсчета время течет медленнее, не противоречит принципу относительности, т. е. утверждению о равноправии всех инерциальных систем отсчета?
6. В каком эксперименте обнаруживается относительность промежутков времени?
7. Как меняется длина стержня в зависимости от его скорости?
8. При каких скоростях движения релятивистский закон сложения скоростей переходит в классический?

§ 99. ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ОТ СКОРОСТИ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ДИНАМИКА

С новыми пространственно-временными представлениями не согласуются при больших скоростях движения законы механики Ньютона. Лишь при малых скоростях движения, когда справедливы классические представления о пространстве и времени, второй закон Ньютона

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \qquad (8.7)$$

не меняет своей формы при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой (выполняется принцип относительности).

Но при больших скоростях движения этот закон в своей обычной (классической) форме несправедлив.

Согласно второму закону Ньютона (8.7) постоянная сила, действуя на тело продолжительное время, может сообщить телу сколь угодно большую скорость. Но в действительности скорость света в вакууме является предельной, и ни при каких условиях тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света в вакууме. Требуется совсем небольшое изменение уравнения движения тел, чтобы это уравнение было верным при больших скоростях движения. Предварительно перейдем к той форме записи второго закона динамики, которой пользовался сам Ньютон:

$$\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \qquad (8.8)$$

где $\vec{p} = m\vec{v}$ — импульс тела. В этом уравнении масса тела считалась независимой от скорости.

Поразительно, что и при больших скоростях движения, близких к скорости света, уравнение движения (8.8) не меняет своей формы. Изменения касаются лишь массы. Именно **при больших скоростях движения масса не остается постоянной, а начинает возрастать по мере приближения скорости движения тела к скорости света** c. Считавшаяся со времен Ньютона на протяжении двух с половиной веков неизменной, масса в действительности зависит от скорости.

Зависимость массы от скорости можно найти, исходя из предположения, что закон сохранения импульса справедлив и при новых представлениях о пространстве и времени. Расчеты слишком сложны. Приведем лишь конечный результат.

Если через m_0 обозначить массу покоящегося тела, то масса m тела движущегося со скоростью v, определяется формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (8.9)$$

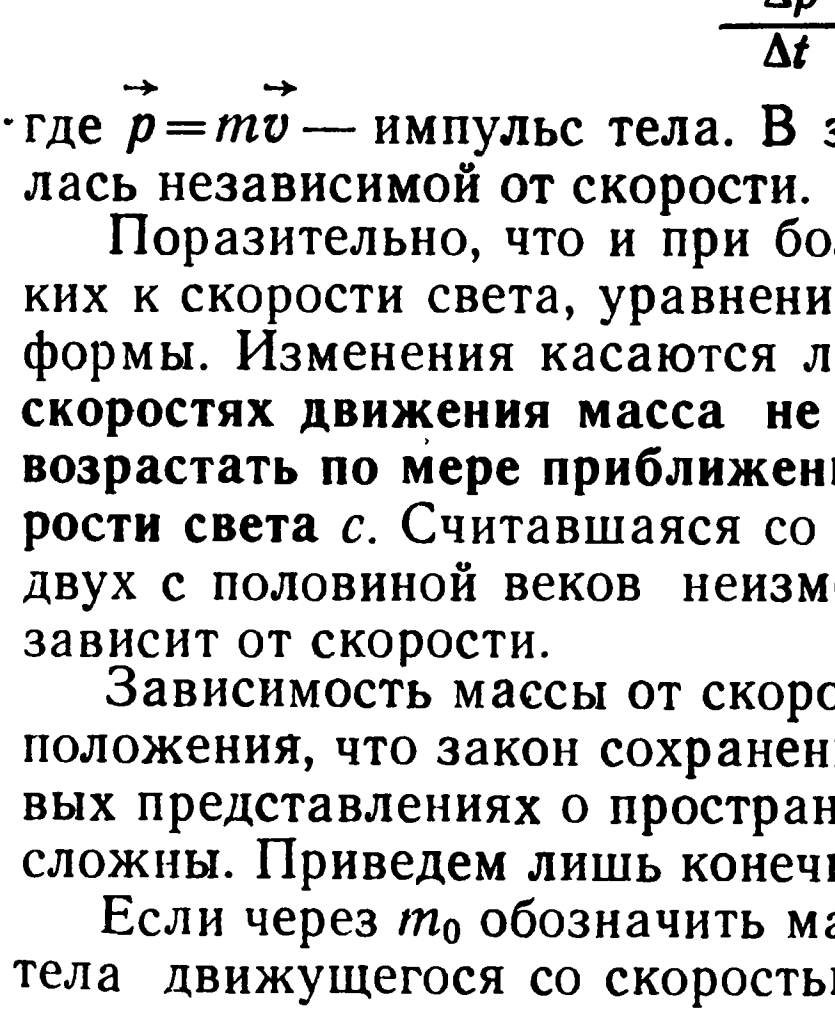


Рис. 227

На рисунке 227 представлена зависимость массы тела от его скорости.

При скоростях движения, много меньших скорости света, выражение $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ чрезвычайно мало отличается от единицы. Так, при скорости современной космической ракеты $v = 10$ км/с

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0{,}99999999944.$$

Не удивительно поэтому, что заметить увеличение массы с ростом скорости при таких сравнительно небольших скоростях движения невозможно. Но элементарные частицы в современных ускорителях заряженных частиц достигают огромных скоростей. Если скорость частицы на 90 км/с меньше скорости света, то ее масса увеличивается в 100 раз. Мощные ускорители для электронов способны разгонять эти частицы до скоростей, которые меньше скорости света лишь на 35—40 м/с. При этом масса электрона возрастает примерно в 2000 раз, и электрон по массе превосходит протон. Чтобы такой электрон удерживался на круговой орбите, на него со стороны магнитного поля должна действовать сила, в 2000 раз большая, чем можно было бы предполагать, не учитывая зависимости массы от скорости. Для расчета траекторий быстрых частиц пользоваться механикой Ньютона уже нельзя.

С учетом соотношения (8.9) импульс тела равен:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (8.10)$$

Основной же закон релятивистской динамики записывается в прежней форме:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

Однако импульс тела здесь определяется формулой (8.10), а не просто произведением $m_0 \vec{v}$.

По мере увеличения скорости движения масса тела, определяющая его инертные свойства, увеличивается. При $v \to c$ масса тела в соответствии с уравнением (8.9) возрастает неограниченно ($m \to \infty$); поэтому ускорение стремится к нулю, и скорость практически перестает возрастать, как бы долго ни действовала сила.

Необходимость пользоваться релятивистским уравнением движения при расчете ускорителей заряженных частиц означает, что теория относительности в наше время стала инженерной наукой.

Законы механики Ньютона можно рассматривать как частный случай релятивистской механики, справедливый при скоростях движения тел, много меньших скорости света.

§ 100. СИНХРОФАЗОТРОН

В IX классе вы познакомились с одним из типов ускорителей элементарных частиц — циклотроном. Принцип его действия основан на том, что время обращения заряженной частицы в магнитном поле по окружности не зависит от радиуса R окружности (или скорости частицы v). Оно определяется массой частицы, ее зарядом и индукцией магнитного поля, в котором частица движется.

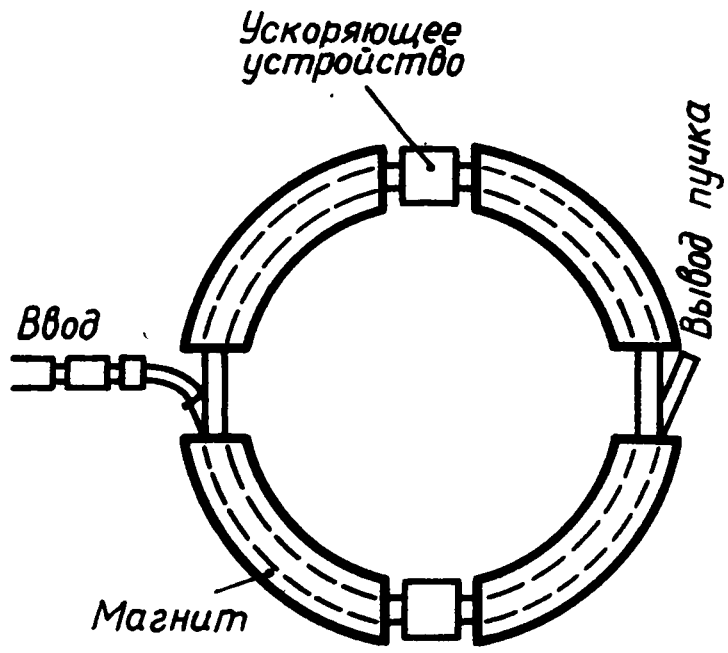


Рис. 228а

Но это справедливо лишь при $v \ll c$. При больших же значениях v масса зависит от скорости и время обращения частицы перестает быть постоянным. Циклотрон поэтому не способен разгонять частицы до больших скоростей и, следовательно, до больших энергий.

В современных мощных ускорителях — *синхрофазотронах* — используется тот же, что и в циклотроне, принцип многократного прохождения заряженных частиц (чаще всего протонов) через ускоряющие промежутки, в которых сосредоточено сильное переменное электрическое поле.

Синхрофазотрон имеет форму кольца больших размеров. Частицы движутся в вакуумной камере, расположенной внутри системы электромагнитов. Траектория каждой частицы состоит из отдельных коротких прямолинейных участков и дуг окружности (рис. 228а). Часть прямолинейных участков используется для размещения электродов, между которыми создается ускоряющее электрическое поле. На других прямолинейных участках располагаются приборы для ввода в ускоритель заряженных частиц и вывода из него пучков частиц, разогнанных до релятивистских скоростей.

Так как каждое прохождение частицей, например протоном, ускоряющего промежутка увеличивает ее скорость (следовательно, и массу), магнитное поле, искривляющее траекторию частицы, не должно оставаться постоянным. Для сохранения радиуса кривизны траектории неизменным магнитное поле должно по мере разгона частиц нарастать. Одновременно (синхронно) с изменением магнитного поля должно строго определенным образом меняться и переменное электрическое поле в ускоряющих промежутках. Чтобы движущийся со все большей и большей скоростью протон подходил к ускоряющему промежутку в момент, когда электрическое поле направлено вдоль его скорости, частота изменения электрического поля должна по мере разгона также расти. Необходимое согласование между ростом магнитного поля и увеличением частоты рассчитывается с помощью релятивистской динамики. Синхрофазотрон — релятивистский прибор.

На рисунке 228б показан общий вид синхрофазотрона на 10 млрд. эВ [1] Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне.

---

[1] Электрон-вольт (эВ) — внесистемная единица энергии, широко применяемая в ядерной физике: 1 эВ = 1,60207 · 10^{-19} Дж. Электрон приобретает энергию 1 эВ, пройдя разность потенциалов 1 В.

Рис. 228б

Крупнейшим ускорителем в нашей стране является в настоящее время синхрофазотрон, построенный вблизи г. Серпухова. Общая масса его магнитов составляет 20 000 т. На длине одного оборота (около 1,5 км) ускоряемые протоны проходят суммарную разность потенциалов в 350 000 В и приобретают соответственно энергию 350 000 эВ. За весь цикл ускорения протоны приобретают энергию свыше 70 млрд. эВ.

§ 101. СВЯЗЬ МЕЖДУ МАССОЙ И ЭНЕРГИЕЙ

Перейдем теперь к важнейшему следствию теории относительности, играющему одну из самых главных ролей в ядерной физике и физике элементарных частиц. Речь пойдет об *универсальной связи между энергией и массой.*

Связь между энергией и массой неизбежно следует из закона сохранения энергии и того факта, что масса тела зависит от скорости его движения. Это видно на простом примере. При нагревании газа в сосуде ему сообщается определенная энергия. Скорость хаотического теплового движения молекул зависит от температуры и увеличивается с нагреванием газа. Увеличение скорости движения молекул согласно формуле (8.9) означает увеличение массы всех молекул. Следовательно, масса газа в сосуде увеличивается при увеличении его внутренней энергии. Между массой газа и его энергией существует связь.

Связь массы с энергией при медленных движениях. Проще всего установить связь массы с энергией количественно на примере движения тела со скоростью v, значительно меньшей скорости света c. Для этого найдем приближенное выражение для зависимости массы от скорости при $v \ll c$. Знаменатель в формуле (8.9) можно записать так:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1-\frac{1}{2}\,\frac{v^2}{c^2}\right)^2 - \frac{1}{4}\,\frac{v^4}{c^4}}.$$

Пренебрегая малой величиной $\frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4}$, получим:

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx 1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}.$$

Поэтому

$$m \approx \frac{m_0}{1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}}.$$

Умножая числитель и знаменатель на $\left(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$ и снова пренебрегая членом $\frac{1}{4}\frac{v^4}{c^4}$, приходим к приближенной формуле

$$m \approx m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \frac{1}{c^2}. \qquad (8.11)$$

Отсюда следует, что изменение массы тела $\Delta m = m - m_0$ при увеличении его кинетической энергии на $\Delta K = \frac{1}{2} m_0 v^2$ выражается так:

$$\Delta m = \frac{\Delta K}{c^2}.$$

Это значит, что **приращение массы тела при увеличении его скорости равно сообщенной ему кинетической энергии, деленной на квадрат скорости света.**

Формула Эйнштейна. В теории относительности этот вывод широко обобщается. С помощью этой теории Эйнштейн установил замечательную по своей простоте и общности формулу связи между энергией и массой:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}. \qquad (8.12)$$

Энергия тела или системы тел равна массе, умноженной на квадрат скорости света. Во всей физике найдется лишь две-три столь же простые универсальные формулы, связывающие фундаментальные физические величины.

Если изменяется энергия системы, то изменяется и ее масса:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \qquad (8.13)$$

Так как коэффициент $\frac{1}{c^2}$ очень мал, то заметные изменения массы возможны лишь при очень больших изменениях энергии. При химических реакциях или при нагревании тел в обычных условиях изменения энергии настолько невелики, что соответствующие изменения массы не удается обнаружить на опыте. Горячий чайник имеет бóльшую массу, чем холодный; но даже с помощью самых чувствительных весов эта разность не обнару-

жена. Лишь при превращениях атомных ядер и элементарных частиц изменения энергии оказываются настолько большими, что и связанное с ними изменение массы уже заметно.

При взрыве водородной бомбы выделяется огромная энергия — около 10^{17} Дж. Эта энергия превышает выработку электроэнергии на всем земном шаре за несколько дней. Выделяющаяся энергия уносится вместе с излучением. Излучение обладает наряду с энергией также и массой, которая составляет приблизительно 0,1% от массы исходных материалов.

Энергия покоя. При малых скоростях движения тела ($v \ll c$) формулу (8.12) можно записать так [1]:

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}. \qquad (8.14)$$

Здесь второй член — это обычная кинетическая энергия тела. Наибольший интерес и новизну представляет собой первый член: он определяет энергию тела при скорости, равной нулю,— так называемую *энергию покоя* E_0:

$$E_0 = m_0 c^2. \qquad (8.15)$$

Это — замечательный результат. **Любое тело обладает энергией уже только благодаря факту своего существования, и величина этой энергии пропорциональна массе покоя** m_0. Самым очевидным экспериментальным доказательством существования энергии покоя является то, что при превращении элементарных частиц, о б л а д а ю щ и х массой покоя, в частицы, у которых $m_0 = 0$, энергия покоя целиком превращается в кинетическую энергию вновь образовавшихся частиц.

1. Запишите формулу зависимости массы тела от скорости его движения.
2. В чем состоит закон взаимосвязи массы и энергии?
3. Что такое энергия покоя?
4. Почему при нагревании тела не удается обнаружить на опыте увеличения его массы?

УПРАЖНЕНИЕ 11

1. С точки зрения наблюдателя, находящегося в движущемся поезде, удары молнии в точке A (впереди поезда) и в точке B (позади поезда) произошли одновременно. Какая молния ударила в землю раньше с точки зрения наблюдателя, находящегося на Земле?
2. Какова скорость электрона, если его масса превышает массу покоя в 40 000 раз?
3. На сколько увеличивается масса одного килограмма воды при нагревании ее на 50° С?

---

[1] При этом мы пользуемся приближенным выражением для массы (8.11).

Глава IX

ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ

§ 102. ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЯ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

До сих пор мы рассматривали распространение световых волн. Теперь познакомимся с излучением света телами.

Свет — это электромагнитные волны с длиной волны $4 \cdot 10^{-5}$—$8 \cdot 10^{-5}$ см. Электромагнитные волны излучаются при ускоренном движении заряженных частиц. Эти заряженные частицы входят в состав атомов, из которых состоит вещество. Но, не зная, как устроен атом, ничего достоверного о механизме излучения сказать нельзя. Ясно лишь, что внутри атома нет света, подобно тому как в струне рояля нет звука. Подобно струне, начинающей звучать лишь после удара молоточка, атомы рождают свет только после их возбуждения.

Для того чтобы атом начал излучать, ему необходимо передать определенное количество энергии. Излучая, атом теряет полученную энергию, и для непрерывного свечения вещества необходим приток энергии к его атомам извне.

Тепловое излучение. Наиболее простой и распространенный вид излучения — это *тепловое излучение,* при котором потери атомами энергии на излучение света компенсируются за счет энергии теплового движения атомов (или молекул) излучающего тела. Чем выше температура тела, тем быстрее движутся атомы. При столкновении быстрых атомов (или молекул) друг с другом часть их кинетической энергии превращается в энергию возбуждения атомов, которые затем излучают свет.

Излучение Солнца — это тепловое излучение. Тепловым источником света является также обычная лампочка накаливания. Это очень удобный, но малоэкономичный источник. Лишь 3—4% всей энергии, выделяемой в нити лампочки электрическим током, преобразуется в световую энергию. Освобождающаяся при сгорании дров, керосина или газа энергия раскаляет крупинки сажи (не успевшие сгореть частицы топлива), и они испускают свет.

Электролюминесценция. Энергия, необходимая атомам для излучения света, может заимствоваться и из нетепловых источников. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию. Быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами. Часть кинетической энергии электронов идет на возбуждение атомов. Возбужденные атомы отдают энергию в виде световых волн. Благодаря этому разряд в газе сопровождается свечением. Это *электролюминесценция* [1].

---

[1] Латинское слово *люминесценция* означает свечение.

Сергей Иванович Вавилов (1891—1951) — выдающийся советский физик, государственный и общественный деятель, президент АН СССР в 1945—1951 гг. Основные научные труды Вавилова посвящены физической оптике, и в первую очередь фотолюминесценции. Вавилов исследовал поляризацию люминесцентиого света, чти привело к выяснению природы элементарных излучателей. Под его руководством была разработана технология изготовления ламп дневного света и развит метод люминесцеитного анализа химического состава веществ. Под руководством Вавилова П. А. Черенков открыл в 1934 г. излучение света электронами, движущимися в среде со скоростью, превышающей скорость света в этой среде.

Северное сияние есть проявление электролюминесценции. Потоки заряженных частиц, испускаемых Солнцем и захватываемых магнитным полем Земли, возбуждают у магнитных полюсов Земли атомы верхних слоев атмосферы и вызывают их свечение. Электролюминесценция используется в трубках для рекламных надписей.

Катодолюминесценция. Свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами, называют *катодолюминесценцией.* Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электроннолучевых трубок телевизоров.

Хемилюминесценция. При некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть этой энергии непосредственно превращается в световую энергию. Источник света остается холодным (он имеет температуру окружающей среды). Это явление называется *хемилюминесценцией.*

Почти каждый из вас, вероятно, знаком с ним. Летом в лесу можно ночью увидеть любопытное насекомое — светлячка. На теле у него «горит» маленький зеленый «фонарик». Вы не обожжете пальцев, поймав его. Светящееся пятнышко на спинке светлячка имеет почти ту же температуру, что и окружающий воздух. Свойством светиться обладают и другие живые организмы: бактерии, насекомые, многие рыбы, обитающие на большой глубине, куда не проникает солнечный свет. Часто светятся в темноте кусочки гниющего дерева.

К сожалению, до сих пор не удалось создать практически пригодных источников света, действие которых было бы основано на хемилюминесценции.

Фотолюминесценция. Падающий на вещество свет частично отражается, а частично поглощается. Энергия поглощаемого света в большинстве случаев вызывает лишь нагревание тел. Однако некоторые тела сами начинают светиться непосредственно под действием падающего на него излучения. Это и есть *фотолюминесценция.* Свет возбуждает атомы вещества (увеличивает их внутреннюю энергию), и после этого они высвечиваются сами.

Например, светящиеся краски, которыми покрывают многие елочные игрушки, излучают свет после их облучения.

Излучаемый при фотолюминесценции свет имеет, как правило, бóльшую длину волны, чем свет, возбуждающий свечение. Это можно наблюдать экспериментально. Если направить на сосуд с флюоресцеином (органический краситель) световой пучок, пропущенный через фиолетовый светофильтр, то эта жидкость начинает светиться зелено-желтым светом, т. е. светом большей длины волны, чем у фиолетового света.

Явление фотолюминесценции широко используется в лампах дневного света. Советский физик С. И. Вавилов предложил покрывать внутреннюю поверхность разрядной трубки веществами, способными ярко светиться под действием коротковолнового излучения газового разряда. Лампы дневного света примерно в три-четыре раза экономичнее обычных ламп накаливания.

§ 103. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ

Ни один из источников не дает *монохроматического света*, т. е. света строго определенной длины волны. В этом нас убеждают опыты по разложению света в спектр с помощью призмы, а также опыты по интерференции и дифракции.

Та энергия, которую несет с собой свет от источника, определенным образом распределена по волнам всех длин, входящих в состав светового пучка. Можно также сказать, что энергия распределена по частотам, так как между длиной волны и частотой существует простая связь:

$$\lambda\nu = c.$$

Любой источник света характеризуется полной энергией, которую он излучает в единицу времени. Излучаемая энергия не распределяется равномерно между волнами различной длины. Поэтому важнейшей характеристикой излучения является распределение испускаемой в единицу времени энергии по длинам волн и частотам.

Это распределение можно найти экспериментально. Для этого с помощью призмы нужно получить спектр и измерить световую энергию, приходящуюся на небольшие спектральные интервалы шириной $\Delta\nu$. Полагаться на глаз при оценке (даже приблизительной) распределения энергии нельзя. Глаз обладает избирательной чувствительностью к свету: максимум его чувствительности лежит в желто-зеленой области спектра. Лучше всего воспользоваться тем, что очень черное тело почти полностью поглощает свет всех длин волн и при этом световая энергия вызывает нагревание. Достаточно измерить температуру тела, и по ней можно судить о количестве поглощенной в единицу времени энергии.

Обычный термометр имеет слишком малую чувствительность для того, чтобы его можно было с успехом использовать в таких

опытах. Нужны более чувствительные приборы для измерения температуры. Можно взять болометр, о котором говорилось в учебнике физики для IX класса. Металлическую пластинку болометра надо покрыть тонким слоем сажи. Сажа почти полностью поглощает свет любой длины волны.

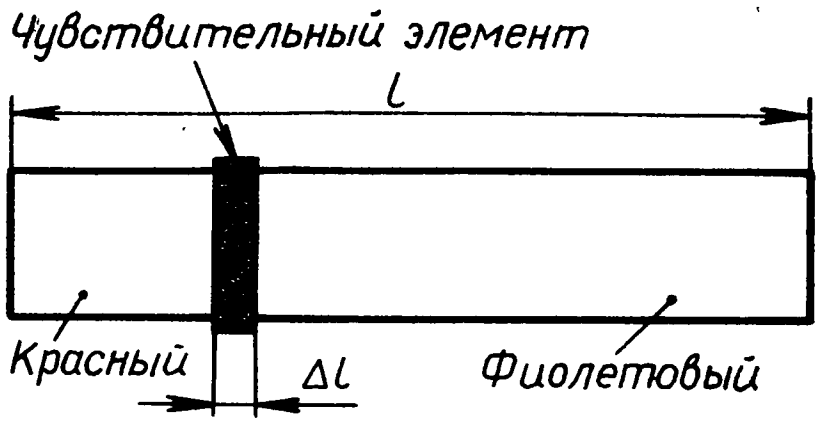


Рис. 229

Чувствительную к нагреванию пластинку прибора следует поместить в то или иное место спектра, полученного путем разложения с помощью призмы света от дугового фонаря (рис. 229). Всему видимому спектру длиной l от красных лучей до фиолетовых соответствует интервал частот от $\nu_{кр}$ до $\nu_ф$. Ширине же Δl черной пластинки соответствует малый интервал $\Delta\nu$. По нагреванию черной пластинки прибора можно судить о количестве световой энергии, приходящейся на интервал частот $\Delta\nu$. Перемещая пластинку вдоль спектра, мы обнаружим, что бóльшая часть энергии приходится на красную часть спектра, а не на желто-зеленую, как кажется на глаз.

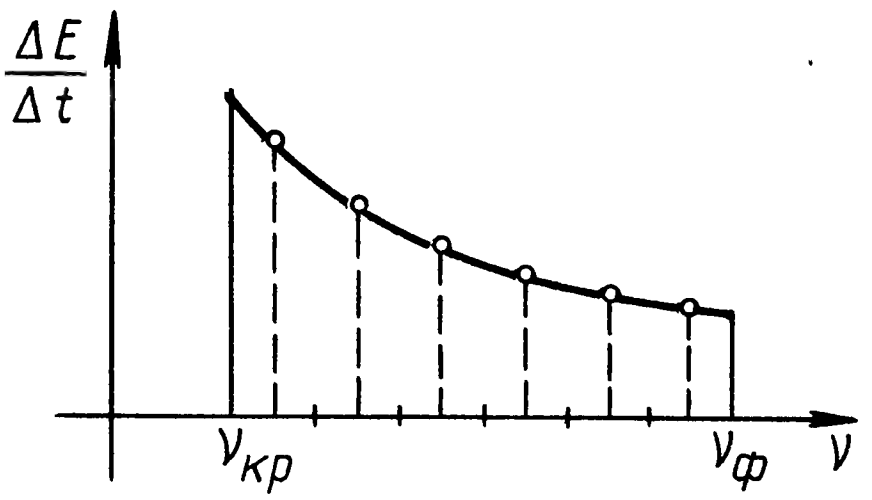


Рис. 230

По результатам этих опытов можно построить кривую зависимости излучаемой в единицу времени энергии от частоты. Энергия излучения определяется по температуре пластинки, а частоту нетрудно найти, если используемый для разложения света прибор проградуирован, т. е. если известно, какой частоте соответствует данный участок спектра.

Откладывая по оси абсцисс значения частот, соответствующих серединам интервалов $\Delta\nu$, а по оси ординат — поглощаемую пластинкой прибора в единицу времени энергию $\frac{\Delta E}{\Delta t}$, мы получим ряд точек, через которые можно провести плавную кривую (рис. 230). Эта кривая дает наглядное представление о распределении энергии в видимой части спектра электрической дуги. Подобным образом исследуется излучение и других источников.

§ 104. СПЕКТРАЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

Для точного исследования спектров такие простые приспособления, как узкая щель, ограничивающая световой пучок, и призма, уже недостаточны. Более совершенное устройство с применением призмы и одной линзы (см. рис. 197), предложенное Ньюто-

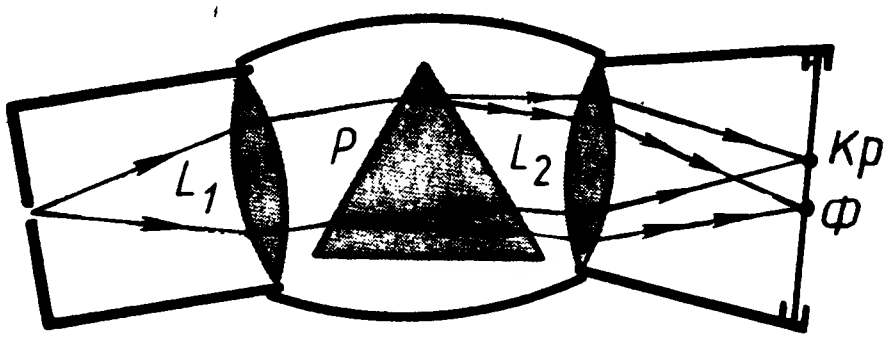


Рис. 231

ном, также не вполне удовлетворительно. Необходимы приборы, дающие четкий спектр, т. е. приборы, хорошо разделяющие волны различной длины и не допускающие (или почти не допускающие) перекрытия отдельных участков спектра. Такие приборы носят название *спектральных аппаратов*. Чаще всего основной частью спектрального аппарата является призма или дифракционная решетка.

Рассмотрим устройство призменного спектрального аппарата. Схема его показана на рисунке 231. Исследуемое излучение поступает вначале в часть прибора, называемую коллиматором. Коллиматор представляет собой трубу, на одном конце которой имеется ширма с узкой щелью, а на другом — собирающая линза L_1. Щель находится в фокальной плоскости линзы. Поэтому расходящийся световой пучок, попадающий на линзу из щели, выходит из нее параллельным пучком и падает на призму P.

Так как разным частотам соответствуют различные показатели преломления, то из призмы выходят параллельные пучки, не совпадающие по направлению. Они падают на линзу L_2. В фокальной плоскости этой линзы располагается экран: матовое стекло или фотопластинка. Линза L_2 фокусирует параллельные пучки лучей на экране, и вместо одного изображения щели получается целый ряд изображений. Каждой частоте (точнее, узкому спектральному интервалу) соответствует свое изображение. Все эти изображения вместе и образуют спектр.

Описанный прибор называется *спектрографом*. Если вместо второй линзы и экрана используется зрительная труба для визуального наблюдения спектров, то прибор называется *спектроскопом*. Призмы и другие детали спектральных аппаратов не обязательно изготовляются из стекла. Вместо стекла применяются и другие прозрачные материалы: кварц, каменная соль и др. Дело в том, что стекло, прозрачное для электромагнитных волн видимого спектра, сильно поглощает волны других длин.

§ 105. ТИПЫ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектральный состав излучения различных веществ весьма разнообразен. Но, несмотря на это, все спектры, как показывает опыт, можно разделить на три сильно отличающихся друг от друга типа.

Непрерывные спектры. Солнечный спектр или спектр дугового фонаря является *непрерывным*. Это означает, что в спектре представлены все длины волн. В спектре нет разрывов, и на экране спектрографа можно видеть сплошную разноцветную полосу (рис. V, 1 на цветной вклейке).

Распределение энергии по частотам (или длинам волн) для различных тел будет различным. Например, тело с очень черной поверхностью излучает электромагнитные волны всех частот, но кривая зависимости энергии от частоты имеет максимум при определенной частоте ν_m (рис. 232). Энергия излучения, приходящаяся на очень малые ($\nu \to 0$) и очень большие ($\nu \to \infty$) частоты, ничтожно мала. При повышении температуры максимум энергии излучения смещается в сторону коротких длин волн.

Непрерывные (или сплошные) спектры, как показывает опыт, дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии. Для получения непрерывного спектра нужно нагреть тело до высокой температуры.

Характер непрерывного спектра и сам факт его существования определяется не только свойствами отдельных излучающих атомов, но и в сильной степени зависит от взаимодействия атомов друг с другом. Газы не дают непрерывного спектра. А жидкости и твердые тела отличаются от газов в первую очередь тем, что их атомы взаимодействуют между собой весьма сильно.

Непрерывный спектр дает также высокотемпературная плазма. Электромагнитные волны излучаются плазмой в основном при столкновении электронов с ионами.

Линейчатые спектры. Если в бледное пламя газовой горелки внести кусочек асбеста, смоченного раствором обыкновенной поваренной соли, то при наблюдении пламени в спектроскоп на фоне едва различимого непрерывного спектра пламени вспыхнет яркая желтая линия (рис. V, 2 на цветной вклейке). Эту желтую линию дают пары натрия, которые образуются при расщеплении молекул поваренной соли в пламени. На цветной вклейке приведены также спектры водорода и гелия. Каждый из них — это частокол цветных линий различной яркости, разделенных широкими темными полосами. Такие спектры называются *линейчатыми.* Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенных длин волн (точнее, в определенных очень узких спектральных интервалах). На рисунке 233 вы видите примерное распределение энергии в линейчатом спектре. Каждая линия имеет конечную ширину.

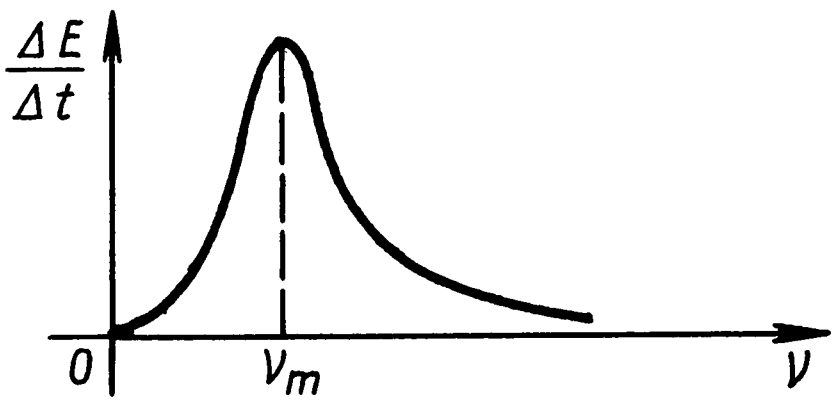


Рис. 232

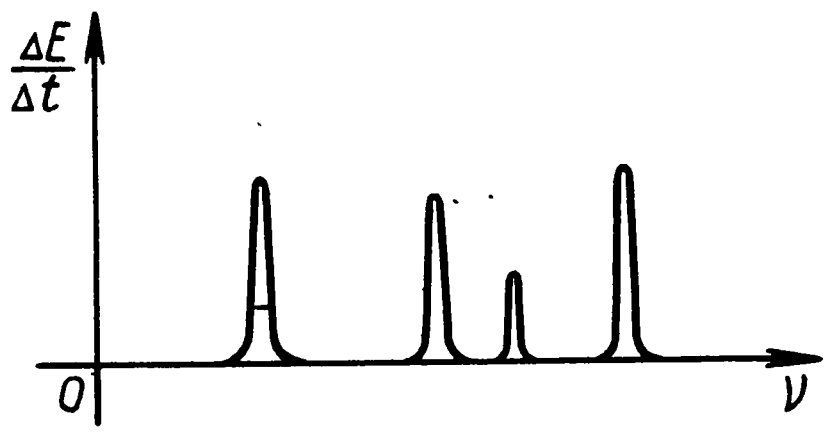


Рис. 233

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае

свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный, основной тип спектров.

Изолированные атомы данного химического элемента излучают строго определенные длины волн.

Обычно для наблюдения линейчатых спектров используют свечение паров вещества в пламени или свечение газового разряда в трубке, наполненной исследуемым газом.

При увеличении плотности атомарного газа отдельные спектральные линии расширяются и, наконец, при очень большой плотности газа, когда взаимодействие атомов становится существенным, эти линии перекрывают друг друга, образуя непрерывный спектр.

Полосатые спектры. Полосатый спектр состоит из отдельных полос, разделенных темными промежутками. С помощью очень хорошего спектрального аппарата можно обнаружить, что каждая полоса представляет собой совокупность большого числа очень тесно расположенных линий.

В отличие от линейчатых спектров полосатые спектры создаются не атомами, а молекулами, не связанными или слабо связанными друг с другом.

Для наблюдения молекулярных спектров так же, как и для наблюдения линейчатых спектров, обычно используют свечение паров в пламени или свечение газового разряда.

§ 106. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Линейчатые спектры играют особо важную роль, потому что их характер прямо связан со строением атома. Ведь эти спектры создаются атомами, не испытывающими внешних воздействий. Поэтому, знакомясь с линейчатыми спектрами, мы тем самым делаем первый шаг к изучению строения атомов. Наблюдая эти спектры, ученые получили возможность «заглянуть» внутрь атома. Здесь оптика вплотную соприкасается с атомной физикой.

Главное свойство линейчатых спектров состоит в том, что **длины волн (или частоты) линейчатого спектра какого-либо вещества зависят только от свойств атомов этого вещества, но совершенно не зависят от способа возбуждения свечения атомов.** Атомы любого химического элемента дают спектр, не похожий на спектры всех других элементов: они способны излучать строго определенный набор длин волн.

На этом основан *спектральный анализ* — метод определения химического состава вещества по его спектру. Подобно отпечаткам пальцев у людей, линейчатые спектры имеют неповторимую индивидуальность. Неповторимость узоров на коже пальца помогает часто найти преступника. Точно так же индивидуальность спектра дает в руки физиков возможность определить химический состав тела, не прикасаясь к нему. С помощью спектраль-

ного анализа можно обнаружить данный элемент в составе сложного вещества, если даже его масса не превышает 10^{-10} г. Это очень чувствительный метод.

Количественный анализ состава вещества по его спектру затруднен, так как яркость спектральных линий зависит не только от массы вещества, но и от способа возбуждения свечения. Так, при не очень высоких температурах многие спектральные линии вообще не появляются. Однако при соблюдении стандартных условий возбуждения свечения можно проводить и количественный спектральный анализ.

В настоящее время определены спектры всех атомов и составлены таблицы спектров. С помощью спектрального анализа были открыты многие новые элементы: рубидий, цезий и др. Элементам часто давали названия в соответствии с цветом наиболее интенсивных линий спектра. Рубидий дает темно-красные, рубиновые линии. Слово *цезий* означает небесно-голубой; это цвет основных линий спектра этого элемента.

Именно с помощью спектрального анализа узнали химический состав Солнца и звезд. Другие методы анализа здесь вообще невозможны. Оказалось, что звезды состоят из тех же самых химических элементов, которые имеются и на Земле. Любопытно, что гелий первоначально открыли на Солнце и лишь затем нашли в атмосфере Земли. Название этого элемента напоминает об истории его открытия: слово *гелий* означает в переводе солнечный.

Благодаря сравнительной простоте и универсальности спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении, атомной индустрии. С помощью спектрального анализа определяют химический состав руд и минералов.

Состав сложных, главным образом органических, смесей анализируется по их молекулярным спектрам.

§ 107. СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

Все вещества, атомы которых находятся в возбужденном состоянии, излучают световые волны, энергия которых определенным образом распределена по длинам волн. Поглощение света веществом также зависит от длины волны. Так, красное стекло пропускает волны, соответствующие красному свету ($\lambda \approx \approx 8 \cdot 10^{-5}$ см), и поглощает все остальные.

Если пропускать белый свет сквозь холодный, неизлучающий газ, то на фоне непрерывного спектра источника появляются темные линии (рис. V, 5—8 на цветной вклейке). **Газ поглощает наиболее интенсивно свет как раз тех длин волн, которые он испускает в сильно нагретом состоянии.** Темные линии на фоне непрерывного спектра — это линии поглощения, образующие в совокупности *спектр поглощения.*

Именно линии поглощения в спектре Солнца и звезд позволяют исследовать химический состав этих небесных тел. Ярко светящаяся поверхность Солнца — фотосфера — дает непрерывный спектр. Солнечная атмосфера поглощает избирательно свет от фотосферы, что приводит к появлению линий поглощения на фоне непрерывного спектра фотосферы.

Но и сама атмосфера Солнца излучает свет. Во время солнечных затмений, когда солнечный диск закрыт Луной, происходит «обращение» линий спектра. На месте линий поглощения в солнечном спектре вспыхивают линии излучения.

§ 108. ИНФРАКРАСНЫЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ЛУЧИ

Инфракрасное излучение. Вернемся к опыту по исследованию распределения энергии в спектре электрической дуги, описанному в § 103. При перемещении черной пластинки — чувствительного элемента прибора — к красному концу спектра обнаруживается увеличение температуры. Если сдвинуть пластинку за красный конец спектра, где глаз уже не обнаруживает света, то нагревание пластинки оказывается еще большим. Электромагнитные волны, вызывающие этот нагрев, называются *инфракрасными.* Их испускает любое нагретое тело даже в том случае, когда оно не светится. Например, нагретая печь или батареи отопления в квартире излучают инфракрасные волны, вызывающие заметное нагревание окружающих тел. Поэтому инфракрасные волны часто называют *тепловыми.*

Не воспринимаемые глазом инфракрасные волны имеют длины, превышающие длину волны красного света. Максимум энергии излучения электрической дуги и лампочки накаливания приходится на инфракрасные лучи.

Инфракрасное излучение применяют для сушки лакокрасочных покрытий, овощей, фруктов и т. д. Созданы приборы, в которых невидимое глазом инфракрасное изображение объекта преобразуется в видимое. Изготовляются бинокли и оптические прицелы, позволяющие видеть в темноте.

Ультрафиолетовое излучение. За фиолетовым концом спектра прибор также обнаружит повышение температуры, но, правда, очень незначительное. Следовательно, существуют электромагнитные волны с длиной волны меньшей, чем у фиолетового света. Они называются *ультрафиолетовыми.*

Обнаружить ультрафиолетовое излучение можно с помощью экрана, покрытого люминесцирующим веществом. Экран начинает светиться сине-зеленым светом в той части, на которую приходятся лучи, лежащие за фиолетовой областью спектра.

Ультрафиолетовые лучи отличаются высокой химической активностью. Повышенную чувствительность к ультрафиолетовому излучению имеет фотоэмульсия. В этом можно убедиться.

спроецировав спектр в затемненном помещении на фотобумагу. После проявления за фиолетовым концом спектра бумага почернеет сильнее, чем в области видимого спектра.

Ультрафиолетовые лучи не вызывают зрительных образов, они невидимы. Но действие их на сетчатку глаза и кожу велико и разрушительно. Ультрафиолетовое излучение Солнца недостаточно поглощается верхними слоями атмосферы. Поэтому высоко в горах нельзя оставаться на снегу без темных стеклянных очков и длительное время без одежды. Стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи. Поэтому стеклянные очки, прозрачные для видимого спектра, защищают глаза от ультрафиолетового излучения.

Впрочем, в малых дозах ультрафиолетовые лучи производят целебное действие. Умеренное пребывание на солнце полезно, особенно в юном возрасте; ультрафиолетовые лучи способствуют росту и укреплению организма. Кроме прямого действия на ткани кожи (образование защитного пигмента — загара, витамина D_2), ультрафиолетовые лучи оказывают влияние на центральную нервную систему, стимулируя ряд важных жизненных функций в организме.

Ультрафиолетовые лучи оказывают также бактерицидное действие. Они убивают болезнетворные бактерии и используются с этой целью в медицине.

§ 109. РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

Может быть, и не все слышали об инфракрасных и ультрафиолетовых лучах, но о существовании *рентгеновских лучей,* конечно, знают все. Эти замечательные лучи проникают сквозь непрозрачные для обычного света тела. Степень их поглощения пропорциональна плотности вещества. Поэтому с помощью рентгеновских лучей можно получать фотографии внутренних органов человека. На этих фотографиях хорошо различимы кости скелета (рис. 234) и места различных перерождений мягких тканей.

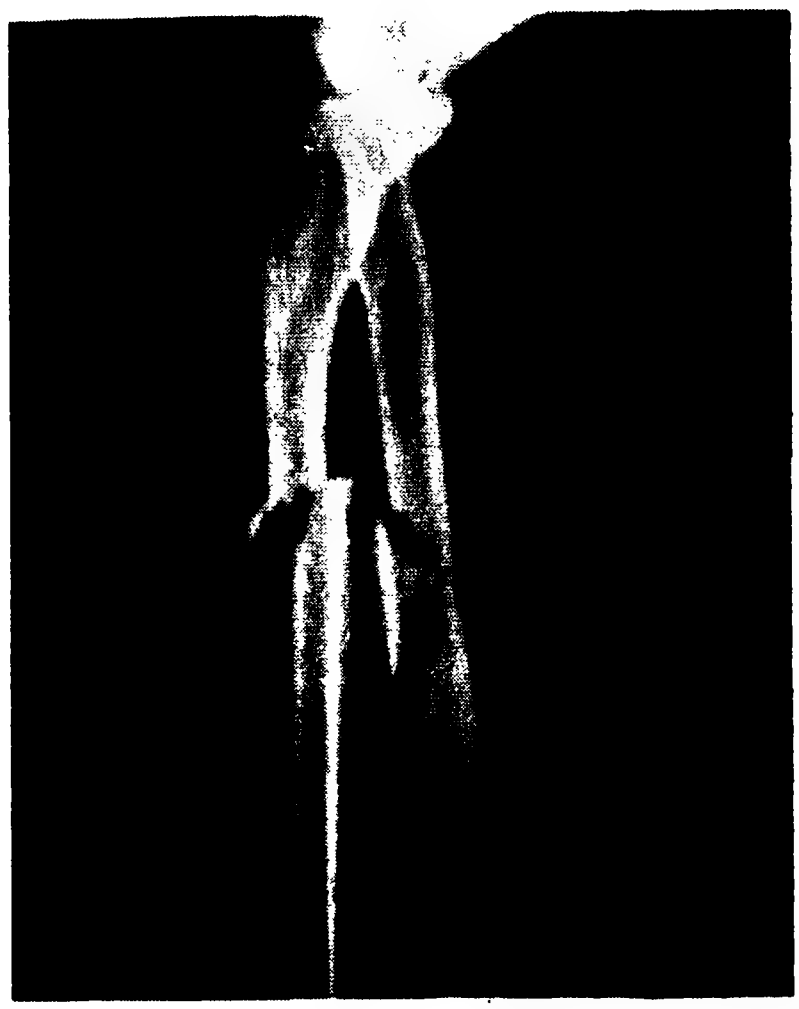


Рис. 234

Сейчас в нашей стране раз в год все граждане должны пройти флюорографию. С помощью рентгеновских лучей делается снимок грудной клетки, чтобы выявить начало возможного заболевания до того, как человек начнет испытывать болезненные ощущения.

Вильгельм Рентген (1845—1923) — выдающийся немецкий физик, открывший в 1895 г. коротковолновое электромагнитное излучение — рентгеновские лучи. Открытие рентгеновских лучей оказало огромное влияние на все последующее развитие физики, в частности привело к открытию радиоактивности. Первая Нобелевская премия по физике была присуждена Рентгену.

Рентген способствовал быстрому распространению практического применения своего открытия в медицине.

Открытие рентгеновских лучей. Эти лучи были открыты в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном. Рентген умел наблюдать, умел замечать новое там, где многие ученые до него не обнаруживали ничего примечательного. Этот особый дар помог ему сделать замечательное открытие.

В конце XIX века всеобщее внимание физиков привлек газовый разряд при малом давлении. При этих условиях в газоразрядной трубке создавались потоки очень быстрых электронов. В то время их называли катодными лучами. Природа этих лучей еще не была с достоверностью установлена; известно было лишь, что эти лучи берут начало на катоде трубки.

Занявшись исследованием катодных лучей, Рентген скоро заметил, что фотопластинка вблизи разрядной трубки оказывалась засвеченной даже в том случае, когда она была завернута в черную бумагу. После этого ему удалось наблюдать еще одно очень поразившее его явление. Бумажный экран, смоченный раствором платиносинеродистого бария, начинал светиться, если им обертывалась разрядная трубка. Причем когда Рентген держал руки между трубкой и экраном, то на экране были видны темные тени костей на фоне более светлых очертаний всей кисти руки.

Ученый понял, что при работе разрядной трубки возникает какое-то неизвестное дотоле сильно проникающее излучение. Он назвал его *X*-лучами. Впоследствии за этим излучением прочно укрепился термин «рентгеновские лучи».

Рентген обнаружил, что новое излучение появлялось в том месте, где катодные лучи (потоки быстрых электронов) сталкивались со стеклянной стенкой трубки. В этом месте стекло светилось зеленоватым светом. Последующие опыты показали, что *X*-лучи возникают при торможении быстрых электронов любым препятствием, в частности металлическими электродами.

Свойства рентгеновских лучей. Лучи, открытые Рентгеном, действовали на фотопластинку, вызывали ионизацию воздуха, но заметным образом не отражались от каких-либо веществ и не испытывали преломления. Электромагнитное поле не оказывало никакого влияния на направление их распространения.

Сразу же возникло предположение, что рентгеновские лучи — это электромагнитные волны, которые излучаются при резком торможении электронов. В отличие от световых лучей видимого участка спектра и ультрафиолетовых лучей рентгеновские лучи имеют гораздо меньшую длину волны. Их длина волны тем меньше, чем больше энергия электронов, сталкивающихся с препятствием. Большая проникающая способность рентгеновских лучей и прочие их особенности связывались именно с малой длиной волны. Но эта гипотеза нуждалась в доказательствах, и доказательства были получены спустя 15 лет после открытия Рентгена.

Дифракция рентгеновских лучей. Если рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, то оно должно обнаруживать дифракцию — явление, присущее всем видам волн Сначала пропускали рентгеновские лучи через очень узкие щели в свинцовых пластинках, но ничего похожего на дифракцию обнаружить не удавалось. Немецкий физик Макс Лауэ предположил, что длина волны рентгеновских лучей слишком мала для того, чтобы можно было обнаружить дифракцию этих волн на искусственно созданных препятствиях. Ведь нельзя сделать щели размером 10^{-8} см, поскольку таков размер самих атомов. А что если рентгеновские лучи имеют примерно такую же длину волны? Тогда остается единственная возможность — использовать кристаллы. Они представляют собой упорядоченные структуры, в которых расстояния между отдельными атомами по порядку величины равны размеру самих атомов, т. е. 10^{-8} см. Кристалл с его периодической структурой и есть то естественное устройство, которое неизбежно должно вызвать заметную дифракцию волн, если длина их близка к размерам атомов.

И вот узкий пучок рентгеновских лучей был направлен на кристалл, за которым была расположена фотопластинка. Результат полностью согласовался с самыми оптимистическими ожиданиями. Наряду с большим центральным пятном, которое давали лучи, распространяющиеся по прямой, возникли регулярно расположенные небольшие пятнышки вокруг центрального пятна (рис. 235). Появление этих пятнышек можно было объяснить только дифракцией рентгеновских лучей на упорядоченной структуре кристалла.

Исследование дифракционной картины позволило определить длину волны рентгеновских лучей. Она оказалась меньше длины волны ультрафиолетового излучения и по порядку величины была равна размерам атома — 10^{-8} см.

Применение рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи нашли себе много очень важных практических применений.

Во-первых, в медицине для постановки правильного диагноза заболевания.

Во-вторых, по дифракционной картине, даваемой рентгеновскими лучами при их прохождении сквозь кристаллы, удается установить порядок расположения атомов в пространстве —

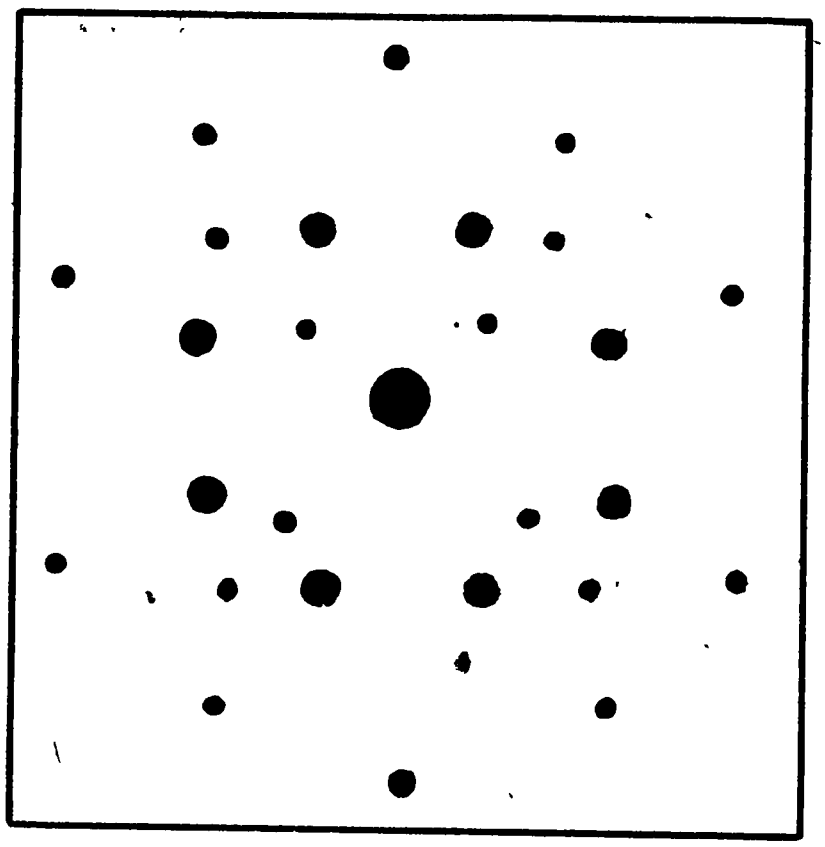


Рис. 235

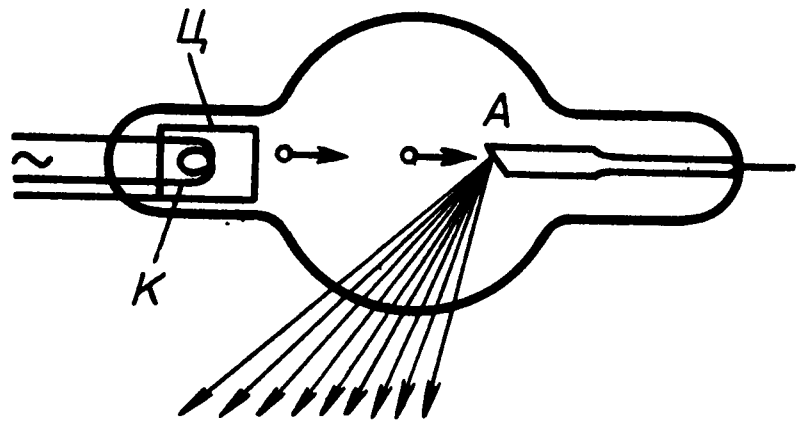


Рис. 236

структуру кристаллов. Сделать это для неорганических кристаллических веществ оказалось не очень сложно. Но с помощью рентгеноструктурного анализа удается расшифровать строение сложнейших органических соединений, включая белки. В частности, была определена структура молекулы гемоглобина, содержащей десятки тысяч атомов.

Эти достижения стали возможными благодаря тому, что длина волны рентгеновских лучей столь мала, что с их помощью можно в принципе «видеть» молекулярные структуры. Видеть, конечно, не в буквальном смысле; речь идет о получении дифракционной картины, с помощью которой после немалой затраты труда на ее расшифровку можно восстановить характер пространственного расположения атомов.

Устройство рентгеновской трубки. Для получения рентгеновских лучей разработаны весьма совершенные устройства, называемые *рентгеновскими трубками*. Они значительно превосходят те первые аппараты, которые сконструировал Рентген.

На рисунке 236 схематически показано устройство электронной рентгеновской трубки. Катод *К* представляет собой вольфрамовую спираль, испускающую электроны за счет термоэлектронной эмиссии. Цилиндр *Ц* фокусирует поток электронов, которые затем соударяются с металлическим электродом (анодом) *А*. При этом рождаются рентгеновские лучи. Напряжение между анодом и катодом достигает нескольких десятков киловольт. В трубке создается глубокий вакуум; давление газа в ней составляет 10^{-5}—10^{-7} мм рт. ст.

§ 110. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Мы знаем, что длина электромагнитных волн может быть самой различной: от километровых радиоволн до рентгеновских лучей с длиной волны около 10^{-8} см. Видимый свет составляет ничтожную часть широкого спектра электромагнитных волн. Тем не менее именно при изучении этой малой части спектра были открыты другие излучения с необычными свойствами.

На внутренних сторонах обложки этой книги вы можете увидеть полную шкалу электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений, а также устройства, с помощью которых получают электромагнитные волны разных диапазонов частоты. Принято выделять *низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и γ-излучение.* Со всеми этими излучениями, кроме γ-излучения, вы уже знакомы. Самое коротковолновое γ-излучение испускают атомные ядра.

Принципиального различия между отдельными излучениями нет. Все они представляют собой электромагнитные волны, порождаемые ускоренно движущимися заряженными частицами. Обнаруживаются электромагнитные волны в конечном счете по их действию на заряженные частицы. В вакууме излучение любой длины волны распространяется со скоростью 300 000 км/с. Границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны.

Однако по мере уменьшения длины волны **количественные различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям.** Излучения различной длины волны отличаются друг от друга по способу их получения (излучение антенны, тепловое излучение, излучение при торможении быстрых электронов) и методам регистрации — по характеру взаимодействия с веществом.

О способах получения и методах регистрации радиоволн было рассказано в главе V; об электромагнитных волнах оптического диапазона (инфракрасных, видимых и ультрафиолетовых) и рентгеновских лучах кратко говорилось в этой главе. В дальнейшем будет рассказано о γ-излучении.

Излучения различной длины волны очень сильно отличаются друг от друга по поглощению их веществом. Коротковолновые излучения (рентгеновское и особенно γ-лучи) поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений. Коэффициент отражения электромагнитных волн также зависит от длины волны. Но главное различие между длинноволновым и коротковолновым излучениями в том, что **коротковолновое излучение обнаруживает свойства частиц.** Об этом пойдет речь в следующей главе.

?

1. Перечислите известные вам источники света.
2. Является ли спектр лампочки накаливания непрерывным?
3. Опишите, как должен быть устроен спектральный аппарат, в котором вместо призмы применяется дифракционная решетка.
4. Какие операции нужно проделать с крупицей вещества, чтобы узнать ее химический состав при помощи спектрального анализа?
5. Почему солнечный свет, прошедший сквозь оконное стекло, не вызывает загара?
6. Что определяется по линиям поглощения в солнечном спектре: состав атмосферы Солнца или же состав его глубинных слоев?
7. Какими способами регистрируются радиоволны? излучения оптического диапазона? рентгеновские лучи?

Глава X

ДЕЙСТВИЯ СВЕТА. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

§ 111. ЗАРОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Величайшая революция в физике совпала с началом XX века. Попытки объяснить наблюдаемые на опытах закономерности распределения энергии в спектрах теплового излучения (электромагнитного излучения нагретого тела) оказались несостоятельными. Многократно проверенные законы электромагнетизма Максвелла неожиданно «забастовали», когда их попытались применить к проблеме излучения веществом коротких электромагнитных волн. И это тем более удивительно, что эти законы превосходно описывают излучение радиоволн антенной и что в свое время само существование электромагнитных волн было предсказано на основе этих законов.

Электродинамика Максвелла приводила к бессмысленному выводу, согласно которому нагретое тело, непрерывно теряя энергию вследствие излучения электромагнитных волн, должно охладиться до абсолютного нуля. Согласно классической теории тепловое равновесие между веществом и излучением невозможно. Однако повседневный опыт показывает, что ничего подобного в действительности нет. Нагретое тело не расходует всю свою энергию на излучение электромагнитных волн.

В поисках выхода из этого противоречия между теорией и опытом немецкий физик Макс Планк предположил, что атомы испускают электромагнитную энергию отдельными порциями — *квантами*. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте ν излучения:

$$E = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности h получил название *постоянной Планка*.

Предположение Планка фактически означало, что законы классической физики неприменимы к явлениям микромира.

Построенная Планком теория теплового излучения превосходно согласовалась с экспериментом. По известному из опыта распределению энергии по частотам было определено значение постоянной Планка. Оно оказалось очень малым:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 6{,}62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}.$$

В следующем параграфе мы рассмотрим другое физическое явление, с помощью которого также можно определить постоянную Планка, но более простым способом.

Макс Планк (1858—1947) — великий немецкий физик-теоретик, основатель квантовой теории — современной теории движения, взаимодействия и взаимных превращений микроскопических частиц. В 1900 г. в работе, посвященной равновесному тепловому излучению, Планк впервые ввел предположение о том, что энергия осциллятора (системы, совершающей гармонические колебания) принимает дискретные значения, пропорциональные частоте колебаний ν. Коэффициент пропорциональности h между энергией и частотой получил название постоянной Планка. Излучается электромагнитная энергия осциллятором отдельными порциями $h\nu$. Большой вклад внес Планк в развитие термодинамики.

Итак, Планк указал выход из трудностей, с которыми столкнулась теория. Но этот успех был получен за счет отказа от законов классической физики применительно к микроскопическим системам и излучению.

§ 112. ФОТОЭФФЕКТ

В развитии представлений о природе света важный шаг был сделан при изучении одного замечательного явления, открытого Г. Герцем и тщательно исследованного выдающимся русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым. Явление это получило название *фотоэффекта.*

Фотоэффектом называют вырывание электронов из вещества под действием света.

Для обнаружения фотоэффекта можно использовать электроскоп с присоединенной к нему цинковой пластиной (рис. 237). Если зарядить пластину положительно, то освещение пластины, например, электрической дугой не влияет на быстроту разрядки электроскопа. Но если пластину зарядить отрицательно, то световой пучок от дуги разряжает его очень быстро.

Объяснить это можно единственным образом. Свет вырывает электроны с поверхности пластины; если она заряжена отрицательно, электроны отталкиваются от нее и электроскоп разряжается. При положительном же заряде пластины вырванные светом электроны притягиваются к пластине и снова оседают на ней. Поэтому заряд электроскопа не изменяется.

Однако, когда на пути светового потока поставлено обыкновенное стекло, отрицательно заряженная пластина уже не теряет электроны, каким бы интенсивным ни был световой поток. Поскольку известно, что стекло поглощает ультрафиолетовые лучи, можно из этого опыта заключить, что именно ультрафиолетовый участок спектра вызывает фотоэффект. Этот сам по себе несложный факт нельзя объяснить на основе волновой теории света. Непонятно, почему световые волны малой частоты не могут вырывать электроны, если даже амплитуда волны велика.

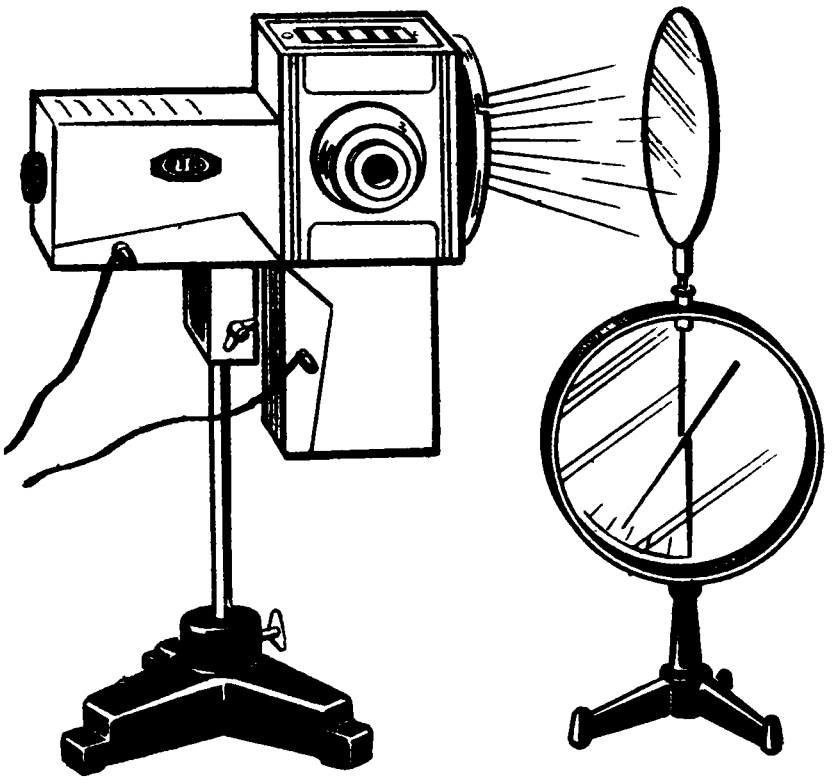


Рис. 237

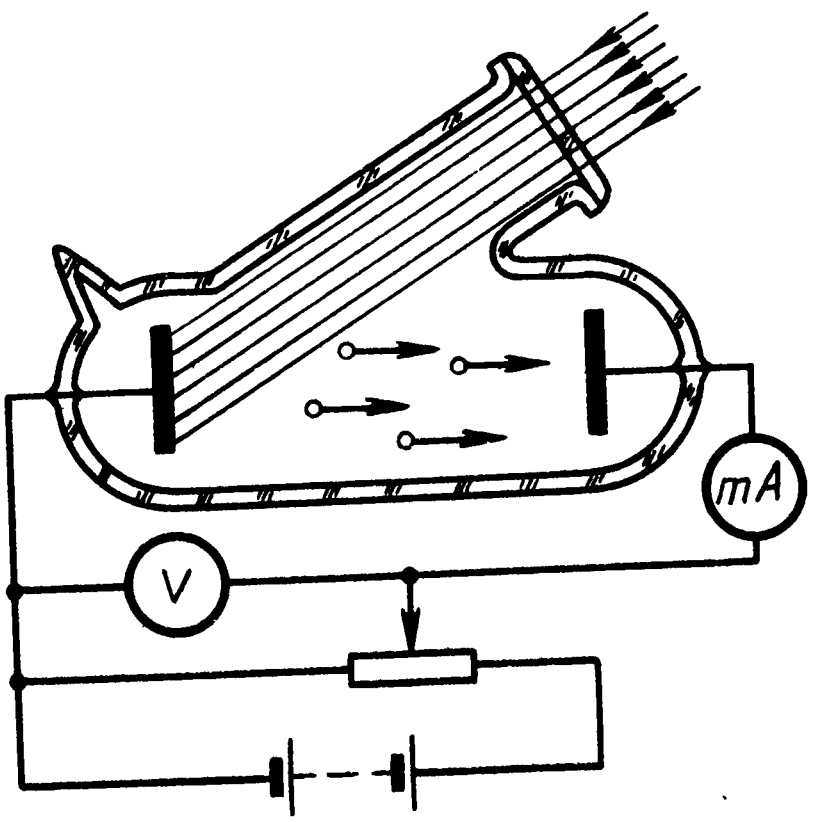


Рис. 238

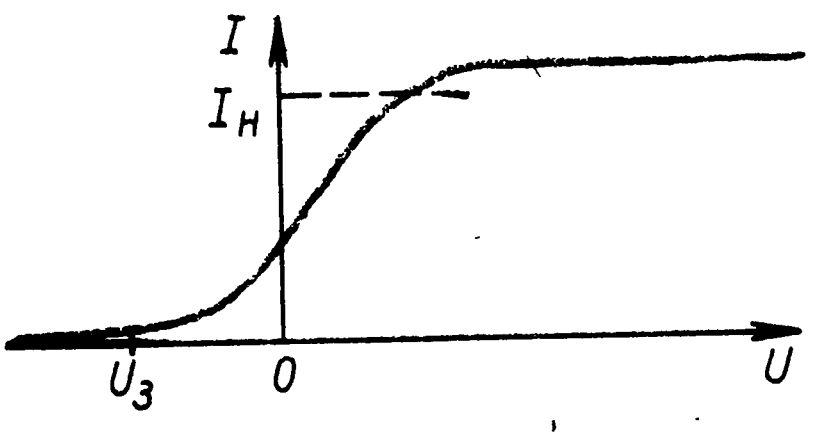


Рис. 239

Законы фотоэффекта. Для того чтобы получить о фотоэффекте более полное представление, нужно выяснить, от чего зависит число вырванных светом с поверхности вещества электронов (фотоэлектронов) и чем определяется их скорость или кинетическая энергия.

Для проведения соответствующих исследований надо проводить опыты в вакууме. В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещают два электрода (рис. 238). Внутрь баллона на один из электродов поступает свет через кварцевое «окошко», прозрачное не только для видимого света, но и для ультрафиолетового излучения. На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра и измерять вольтметром. К освещаемому электроду присоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света этот электрод испускает электроны, которые при движении в электрическом поле образуют ток. Если, не меняя светового потока, увеличивать разность потенциалов между электродами, то сила тока нарастает. При некотором напряжении она достигает максимального значения, после чего перестает увеличиваться (рис. 239). Максимальное значение силы тока $I_н$ называется *током насыщения*. Ток насыщения определяется числом электронов, испущенных за секунду освещаемым электродом. При малых напряжениях не все вырванные светом электроны достигают другого электрода.

Александр Григорьевич Столетов (1839—1896) — выдающийся русский физик. Исследование фотоэффекта доставило Столетову мировую известность. Столетов показал также возможность применения фотоэффекта на практике. В докторской диссертации «Исследование о функции намагничения мягкого железа» он разработал метод исследования ферромагнетиков и установил вид кривой намагничения. Эта работа широко использовалась на практике при конструировании электрических машин.

Много сил отдал Столетов развитию физики в России. Он явился инициатором создания Физического института при Московском университете.

Изменяя в этом опыте световой поток, удалось установить, что **количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за секунду, прямо пропорционально интенсивности световой волны.** В этом ничего неожиданного нет: чем больше энергия светового пучка, тем эффективнее его действие.

Теперь остановимся на измерении кинетической энергии (или скорости) электронов. Из графика, приведенного на рисунке 239, видно, что сила фототока отлична от нуля и при нулевом напряжении. Это означает, что часть вырванных светом электронов достигает правого (см. рис. 238) электрода и при отсутствии напряжения. Если изменить полярность батареи, то ток уменьшится и при некотором напряжении $U_з$ обратной полярности ток станет равным нулю. При этом все электроны возвращаются к электроду, из которого они были вырваны.

Величина *задерживающего напряжения* $U_з$ зависит от максимальной кинетической энергии, которую имеют вырванные светом электроны. Измеряя задерживающее напряжение и применяя закон сохранения энергии, можно найти максимальное значение кинетической энергии электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_з.$$

При изменении интенсивности света задерживающее напряжение, как показали опыты, не меняется. Это означает, что не меняется кинетическая энергия электронов. С точки зрения волновой теории света этот факт непонятен. Ведь чем больше интенсивность света, тем большие силы действуют на электроны со стороны электромагнитного поля световой волны и тем большая энергия, казалось бы, должна передаваться электронам.

На опытах было обнаружено, что кинетическая энергия вырываемых светом электронов зависит только от частоты света. **Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности света.** Если частота света меньше определенной для данного вещества минимальной частоты ν_m, то фотоэффект не происходит.

§ 113. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Все попытки объяснить явление фотоэффекта на основе законов электродинамики Максвелла, согласно которым свет — это электромагнитная волна, непрерывно распределенная в пространстве, оказались безрезультатными. Нельзя было понять, почему энергия фотоэлектронов определяется только частотой света и почему лишь при малой длине свет вырывает электроны.

Объяснение фотоэффекта было дано Эйнштейном в 1905 г. на пути дальнейшего развития идеи Планка о прерывистом испускании света. В экспериментальных законах фотоэффекта Эйнштейн увидел убедительное доказательство того, что **свет имеет прерывистую структуру и поглощается отдельными порциями.** Энергия E каждой порции излучения в полном соответствии с гипотезой Планка пропорциональна частоте:

$$E = h\nu, \tag{10.1}$$

где h — постоянная Планка. Из того, что свет, как показал Планк, излучается порциями, еще не вытекает прерывистая структура самого света. Ведь и дождь выпадает на землю каплями, но отсюда совсем не следует, что вода в ручьях состоит из неделимых частей — капель. Лишь явление фотоэффекта показало, что **свет имеет прерывистую структуру: излученная порция световой энергии $E=h\nu$ сохраняет свою индивидуальность и в дальнейшем в процессе распространения света. Поглотиться может только вся порция целиком.** Энергия каждой порции излучения определяется формулой (10.1).

Кинетическую энергию фотоэлектрона можно найти, применив закон сохранения энергии. Энергия порции света $h\nu$ идет на совершение *работы выхода* A, т. е. работы, которую нужно совершить для извлечения электрона из металла и на сообщение электрону кинетической энергии. Следовательно,

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \tag{10.2}$$

Это уравнение объясняет основные факты, касающиеся фотоэффекта. Интенсивность света, по Эйнштейну, пропорциональна числу квантов (порций) энергии в световом пучке и поэтому определяет число электронов, вырванных из металла. Скорость же электронов согласно (10.2) определяется только частотой света и работой выхода, зависящей от рода металла и состояния его поверхности. От интенсивности света она не зависит.

Для каждого вещества фотоэффект наблюдается лишь в том случае, если частота ν света больше минимального значения ν_m. Ведь чтобы вырвать электрон из металла даже без сообщения ему кинетической энергии, нужно совершить работу выхода A. Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы:

$$h\nu > A$$

Предельную частоту ν_m называют *красной границей фотоэффекта*. Она выражается так:

$$\nu_m = \frac{A}{h}. \qquad (10.3)$$

Работа выхода A зависит от рода вещества. Поэтому и предельная частота ν_m фотоэффекта (красная граница) для разных веществ различна.

Для цинка красной границе соответствует длина волны $\lambda_m = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ см (ультрафиолетовое излучение). Именно этим объясняется опыт по прекращению фотоэффекта с помощью стеклянной пластинки, задерживающей ультрафиолетовые лучи.

Работа выхода у алюминия или железа больше, чем у цинка. Поэтому в опыте, описанном на странице 225, использовалась цинковая пластина. У щелочных металлов работа выхода, напротив, меньше, а длина волны λ_m, соответствующая красной границе, больше. Так, для натрия $\lambda_m = 6{,}8 \cdot 10^{-5}$ см.

Пользуясь уравнением Эйнштейна (10.2), можно найти постоянную Планка h. Для этого нужно экспериментально определить частоту света ν, работу выхода A и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов. Такого рода измерения и расчеты дают $h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с $= 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ эрг $\cdot$ с, т. е. точно такое же значение, какое было найдено Планком при теоретическом изучении совершенно другого явления — теплового излучения. Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами, подтверждает правильность предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

§ 114. ФОТОНЫ

При испускании и поглощении свет ведет себя подобно потоку частиц с энергией $E = h\nu$, зависящей от частоты. Порция света оказалась неожиданно очень похожей на то, что принято называть частицей. Свойства света, обнаруживаемые при излучении и поглощении, называют корпускулярными (слово *корпускула* означает частица). Сама же световая частица получила название *фотона* или *светового кванта*.

Фотон, подобно частицам, обладает определенной порцией энергии $h\nu$. Энергию фотона часто выражают не через частоту ν, а через циклическую частоту $\omega = 2\pi\nu$. При этом в качестве коэффициента пропорциональности вместо величины h используют величину $\hbar$ (читается: *аш с чертой*), равную

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 1{,}05 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}.$$

Тогда энергия фотона выражается так:

$$E = h\nu = \hbar\omega. \qquad (10.4)$$

Согласно теории относительности энергия всегда связана с массой соотношением $E=mc^2$. Так как энергия фотона равна $h\nu$, то, следовательно, его масса m определяется так:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \qquad (10.5)$$

Фотон не имеет массы покоя m_0, т. е. он не существует в состоянии покоя, и при рождении сразу приобретает скорость c. Масса, определяемая формулой (10.5), — это масса движущегося фотона. По известной массе и скорости фотона можно найти его импульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \qquad (10.6)$$

Направлен импульс фотона по световому лучу.

Чем больше частота, тем больше энергия и импульс фотона и тем отчетливее выражены корпускулярные свойства света. Из-за того, что постоянная Планка мала, энергия фотонов видимого света крайне незначительна. Фотоны, соответствующие зеленому свету, имеют энергию $4 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тем не менее в замечательных опытах С. И. Вавилова было установлено, что человеческий глаз, этот тончайший из «приборов», способен реагировать на различие освещенностей, измеряемое единичными квантами.

Итак, ученые были вынуждены ввести представление о свете как о потоке частиц. Может показаться, что это возврат к корпускулярной теории Ньютона. Однако нельзя забывать, что интерференция и дифракция света вполне определенно говорят о наличии у света волновых свойств. Свет обладает своеобразным *дуализмом* (двойственностью) свойств. При распространении света проявляются его волновые свойства, а при взаимодействии с веществом (излучении и поглощении) — корпускулярные. Все это, конечно, странно и непривычно. Мы не в состоянии представить себе наглядно, как же это может быть. Но тем не менее это факт. Мы лишены возможности представлять себе наглядно в полной мере процессы в микромире, так как они совершенно отличны от тех макроскопических явлений, которые человечество наблюдало на протяжении миллионов лет и основные законы которых были сформулированы к концу XIX века.

С течением времени двойственность свойств была открыта у электронов и других элементарных частиц. Электрон, в частности, наряду с корпускулярными свойствами обладает также и волновыми. Наблюдается дифракция электронов.

Эти необычайные свойства микрообъектов описываются с помощью *квантовой механики* — современной теории движения микрочастиц. Механика Ньютона оказывается здесь неприменимой. Но изучение квантовой механики выходит за рамки школьного курса физики.

§ 115. ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭФФЕКТА

Открытие фотоэффекта имело очень большое значение для более глубокого понимания природы света. Но ценность науки состоит не только в том, что она выясняет сложное и многообразное строение окружающего нас мира, но и в том, что она дает нам в руки средства, используя которые можно совершенствовать производство, улучшать условия материальной и культурной жизни общества.

С помощью фотоэффекта «заговорило» кино; благодаря ему можно теперь передавать движущиеся изображения. Применение фотоэлектронных приборов позволило создать станки, которые без всякого участия человека изготовляют детали по заданным чертежам. Основанные на фотоэффекте приборы контролируют размеры изделий лучше любого человека, вовремя включают и выключают маяки и уличное освещение и т. д.

Все это оказалось возможным благодаря изобретению особых устройств — *фотоэлементов,* в которых энергия света управляет энергией электрического тока или преобразуется в нее.

Современный фотоэлемент представляет собой стеклянную колбу, часть внутренней поверхности которой покрыта тонким слоем металла с малой работой выхода (рис. 240). Это — катод. Через прозрачное «окошко» свет проникает внутрь колбы. В ее центре расположена проволочная петля или диск — анод. Он служит для улавливания фотоэлектронов и присоединяется к положительному полюсу батареи. Применяемые фотоэлементы реагируют на видимый свет и даже на инфракрасные лучи.

При попадании света на катод фотоэлемента в цепи возникает электрический ток, который приводит в действие то или иное реле. Комбинация фотоэлемента с реле позволяет конструировать множество различных видящих автоматов. Одним из них является автомат в метро. Он срабатывает (выдвигает перегородку) при пересечении светового пучка, если предварительно не опущена пятикопеечная монета.

Подобного рода автоматы могут предотвращать аварии. На заводе фотоэлемент почти мгновенно останавливает мощный пресс, если рука человека окажется в опасной зоне.

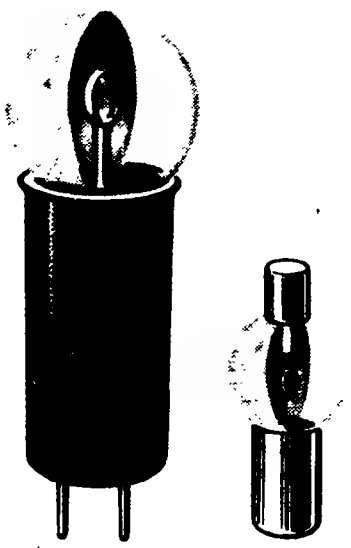


Рис. 240

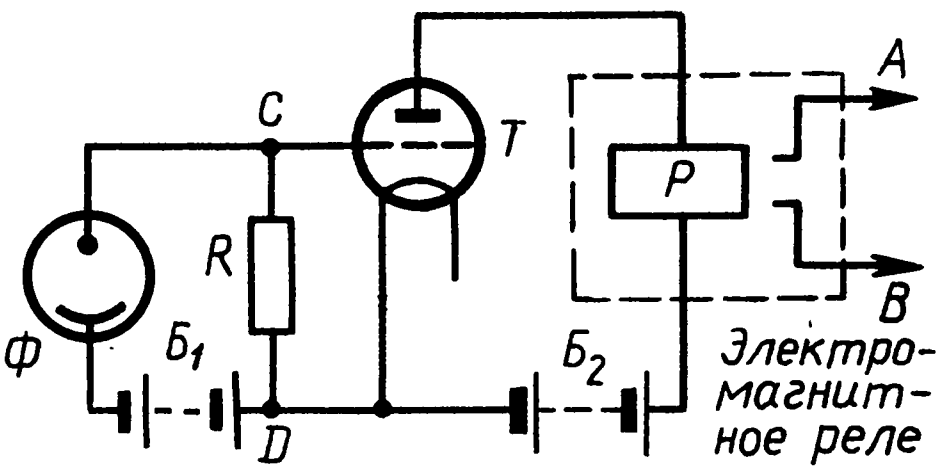
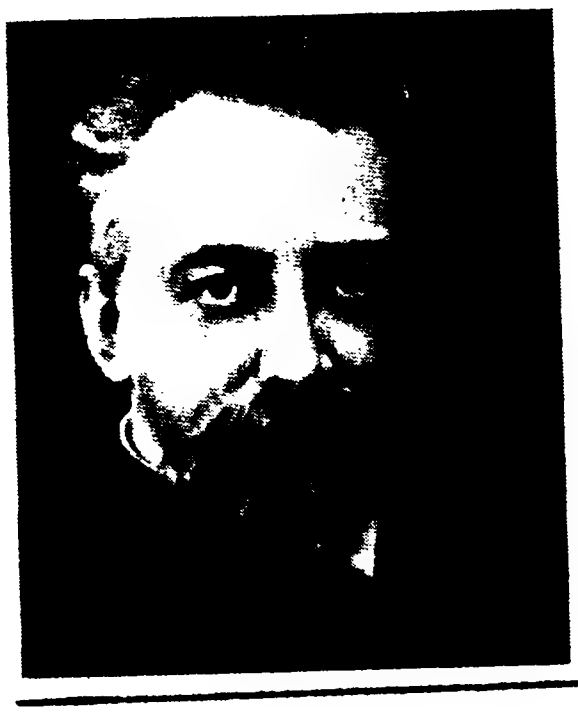


Рис. 241



Петр Николаевич Лебедев (1866—1912) — знаменитый русский физик, впервые измеривший давление света на твердые тела и газы. Эти работы Лебедева количественно подтвердили теорию Максвелла.

Стремясь найти новые экспериментальные доказательства электромагнитной теории света, Лебедев получил электромагнитные волны миллиметровой длины и исследовал все их свойства.

Лебедев создал первую в России физическую школу. Его учениками являются многие выдающиеся советские ученые. Имя Лебедева носит Физический институт АН СССР (ФИАН).

Схема фотореле показана на рисунке 241. При попадании света на фотоэлемент в цепи батареи $Б_1$ через резистор R идет слабый ток. К концам резистора присоединены сетка и катод триода T. Потенциал точки C (сетки) ниже потенциала точки D (катода). Лампа заперта, и ток в анодной цепи триода отсутствует. Когда же рука человека попадает в опасную зону, она перекрывает световой поток, идущий на фотоэлемент. Лампа отпирается, и через обмотку электромагнитного реле, включенную в анодную цепь, пойдет ток. Реле сработает, и контакты реле замкнут цепь питания механизма, который остановит пресс.

Кроме рассмотренного в этой главе фотоэффекта, называемого еще *внешним фотоэффектом,* разнообразные применения находит *внутренний фотоэффект* в полупроводниках. Это явление используется в фотосопротивлениях — приборах, сопротивление которых зависит от освещенности. Кроме того, сконструированы полупроводниковые фотоэлементы, непосредственно преобразующие световую энергию в энергию электрического тока. Эти приборы сами могут служить источниками тока. Их можно использовать для измерения освещенности, например в фотоэкспонометрах. На этом же принципе основано действие солнечных батарей, устанавливаемых на всех космических кораблях.

§ 116. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Максвелл на основе электромагнитной теории света предсказал, что свет должен оказывать давление на препятствия.

Под действием электрического поля волны электроны в телах совершают колебания. Образуется электрический ток. Этот ток направлен вдоль напряженности электрического поля (рис. 242). На упорядоченно движущиеся электроны действует сила Лоренца $\vec{F}$ со стороны магнитного поля. По правилу левой руки сила Лоренца направлена в сторону распространения волны. Это и есть сила *светового давления.*

Для доказательства справедливости теории Максвелла было важно измерить давление света. Многие ученые пытались это сделать, но безуспешно, так как световое давление очень мало. В яр-

кий солнечный день на один квадратный метр действует сила всего лишь $4 \cdot 10^{-8}$ Н. Впервые давление света измерил знаменитый русский физик Петр Николаевич Лебедев в 1900 г.

Прибор Лебедева состоял из очень легкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были приклеены легкие крылышки (рис. 243). Весь прибор помещался в сосуд, из которого был выкачан воздух. Свет падал на крылышки, расположенные по одну сторону от стерженька. О величине давления можно было судить по углу закручивания нити. Трудности точного измерения давления света были связаны с невозможностью выкачать из сосуда весь воздух. Движение молекул воздуха, вызванное неодинаковым нагревом крылышек и стенок сосуда, закручивает нить. Кроме того, на закручивание нити влияет неодинаковый нагрев сторон крылышек (сторона, обращенная к источнику света, нагревается больше, чем противоположная сторона). Молекулы, отражающиеся от более нагретой стороны, передают крылышку больший импульс, чем молекулы, отражающиеся от менее нагретой стороны.

Лебедев сумел преодолеть все эти трудности, несмотря на низкий уровень тогдашней экспериментальной техники, взяв очень большой сосуд и очень тонкие крылышки. В конце концов существование светового давления на твердые тела было доказано, и оно было измерено. Полученное значение совпало с предсказанным Максвеллом. Впоследствии после трех лет работы Лебедеву удалось осуществить еще более тонкий эксперимент: измерить давление света на газы.

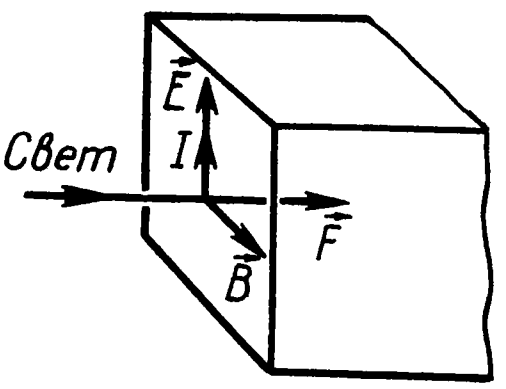


Рис. 242

Появление квантовой теории света позволило объяснить причину светового давления. Фотоны, подобно частицам вещества, имеющим массу покоя, обладают импульсом. При поглощении их телом они передают ему свой импульс. Согласно закону сохранения импульса импульс тела равен импульсу поглощенных фотонов. Поэтому покоящееся тело приходит в движение. Изменение импульса тела означает согласно второму закону Ньютона, что на тело действует сила.

Опыты Лебедева можно рассматривать как экспериментальное доказательство того, что фотоны обладают импульсом. Закон сохранения импульса является совершенно общим. Он справедлив как для обычного вещества, так и для фотонов — квантов электромагнитного поля.

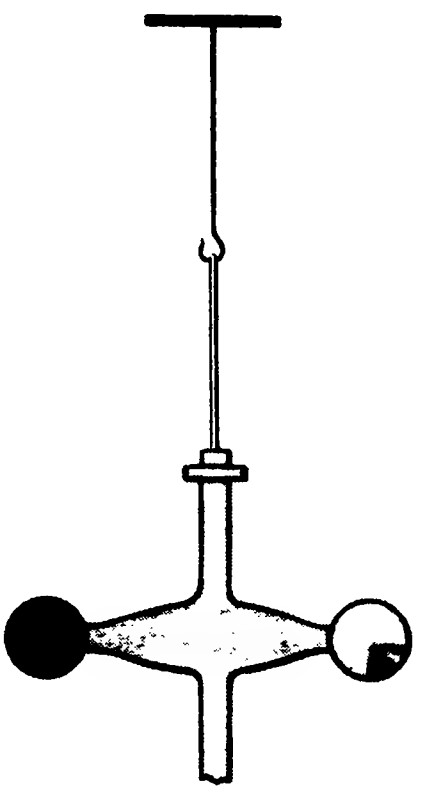


Рис. 243

а *б*

Рис. 244

Хотя световое давление очень мало в обычных условиях, его действие тем не менее может оказаться существенным. Внутри звезд при температуре в несколько десятков миллионов градусов давление электромагнитного излучения должно достигать громадной величины. Это давление наряду с гравитационными силами играет существенную роль во внутризвездных процессах.

§ 117. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ СВЕТА. ФОТОГРАФИЯ

Отдельные молекулы поглощают световую энергию порциями — квантами $h\nu$. В случае видимого света и ультрафиолетового излучения эта энергия достаточна для расщепления многих молекул. В этом проявляется *химическое действие света*. Ведь любое превращение молекул есть химический процесс. Часто после расщепления молекул светом начинается целая цепочка химических превращений. Выцветание тканей на солнце и образование загара — это примеры химического действия света.

Важнейшие же химические реакции под действием света происходят в зеленых листьях деревьев и травы, в иглах хвои и во многих микроорганизмах. В зеленом листе под действием Солнца происходят необходимые для всей жизни на Земле процессы. Они дают нам пищу, они же дают нам кислород для дыхания.

Листья поглощают из воздуха углекислый газ и расщепляют его молекулы на составные части: углерод и кислород. Происходит это, как установил русский биолог Климент Аркадьевич Тимирязев, в молекулах хлорофилла под действием красных лучей солнечного спектра. Пристраивая к углеродной цепочке атомы других элементов, извлекаемых корнями из земли, растения строят молекулы белков, жиров и углеводов — пищу для нас и животных.

Все это происходит за счет энергии солнечных лучей. Причем здесь особенно важна не только сама энергия, а та форма, в которой она поступает. *Фотосинтез* (так называют этот процесс) может протекать только под действием света в определенном интервале спектра.

Механизм фотосинтеза еще не выяснен до конца. Когда это случится, для человечества, возможно, наступит новая эра. Белки и другие сложные органические вещества можно будет изготовлять на фабриках под голубым небосводом.

Химическое действие света лежит в основе *фотографии.*

Чувствительный слой фотопластинки состоит из маленьких кристалликов бромистого серебра (AgBr), вкрапленных в желатин. Попадание световых квантов в кристаллик приводит к отрыву электронов от отдельных ионов брома. Эти электроны захватываются ионами серебра, и в кристаллике образуется небольшое количество нейтральных атомов серебра. Однако количество металлического серебра, выделившегося за счет этого процесса, мало.

Действительно, можно заметить, что фотопластинка (или фотопленка) с течением времени на свету чернеет, но довольно незначительно. Это почернение вызвано образованием металлического серебра. Полученное на фотопластинке под действием света изображение объекта называют *скрытым.*

При обработке пластинки первая операция состоит в *проявлении.* Пластинка погружается в раствор гидрохинона, метола или других веществ, под действием которых во всем кристаллике бромистого серебра, подвергшегося воздействию света, происходит выделение металлического серебра. На пластинке получается негативное изображение объекта, в котором место светлых участков занимают темные и наоборот (рис. 244, *а*).

Следующая операция — *закрепление* — состоит в том, что оставшиеся кристаллики бромистого серебра растворяются и вымываются. Благодаря этому пластинка становится нечувствительной к свету. Для закрепления погружают пластинку в раствор гипосульфита. После промывания в воде негатив готов.

Накладывая его на фотобумагу, т. е. на обычную бумагу с нанесенным на нее светочувствительным слоем, получают после освещения и аналогичной химической обработки позитивное изображение (рис. 244, *б*). На позитиве уже правильно (без обращения) передается распределение светлых и темных тонов.

Фотография весьма точно и на долгое время способна зафиксировать события, неотвратимо уходящие все далее и далее в прошлое. Большое значение имеет фотография для науки. Такие быстрые процессы, как, например, удар молнии, можно запечатлеть на фотографии и в дальнейшем детально изучить.

Объекты, посылающие столь слабый свет, что они не различимы глазом, могут быть зафиксированы на фотопластинке при достаточно большой выдержке, т. е. большом времени освещения

пластинки. Именно поэтому такие очень удаленные от нас объекты, как галактики, изучаются по фотографиям.

Современная техника позволяет фотографировать не только при видимом свете, но и в темноте при инфракрасных лучах.

§ 118. ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА В КИНО

Всего лишь 40 лет назад кино было немым: на экране люди двигались, шевелили губами, но вместо живой человеческой речи зрителям приходилось довольствоваться чтением пояснительного текста. Кино много выиграло, когда одновременно с показом фильма стал слышен разговор героев, свист ветра, грохот битвы и т. д. Все это оказалось возможным благодаря записи звука оптическим методом и воспроизведению его с помощью фотоэлементов.

Если вы посмотрите на кусок киноленты, то с одного ее края увидите так называемую *звуковую дорожку*. Звук записан в виде темной полоски переменной ширины. Это «фотография звука».

Модуляция светового потока при звукозаписи осуществляется различными способами. Схема одного из способов представлена на рисунке 245. Луч света от источника *1* проходит через конденсор *2* и попадает на отверстие клиновидной формы — маску *3*. Отразившись от зеркальца *5*, свет проходит сквозь узкую щель *6*. Линза *4* проецирует изображение маски на экран со щелью, а линза *7* проецирует изображение щели на кинопленку *8*.

Зеркало *5* укреплено на горизонтальной оси. На той же оси укреплена рамка с обмоткой, находящейся в магнитном поле постоянного магнита (как в гальванометре).

Переменный ток звуковой частоты после усиления попадает на обмотку рамки и вызывает колебания зеркальца вокруг горизонтальной оси. В результате изображение маски перемещается и ширина освещенного участка щели *6* меняется в такт с изменением силы тока. Соответственно меняется и ширина светлой полоски на пленке. После проявления получается негативное «изображение» звука. Позитивное «изображение» имеет вид темной полоски переменной ширины.

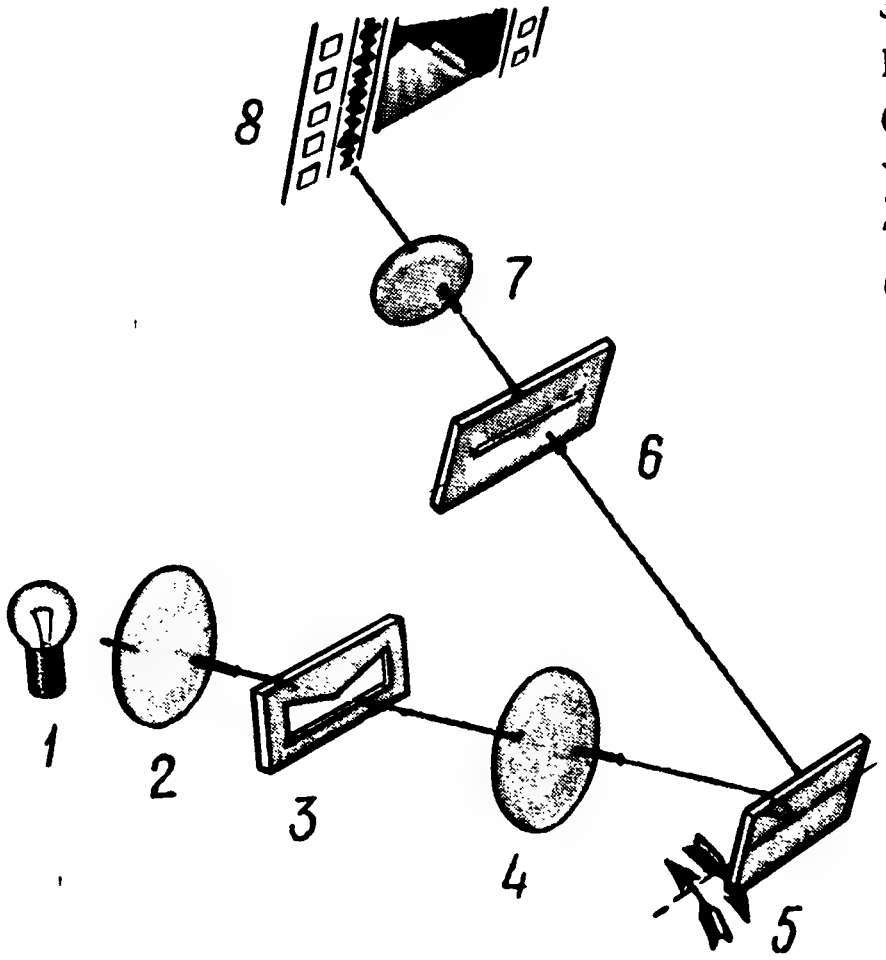


Рис. 245

Фотоэлемент совершает обратное преобразование «фотографии звука» в сам звук. Происходит это так. В кинопроекторе звуковая дорожка освещается узким пучком света.

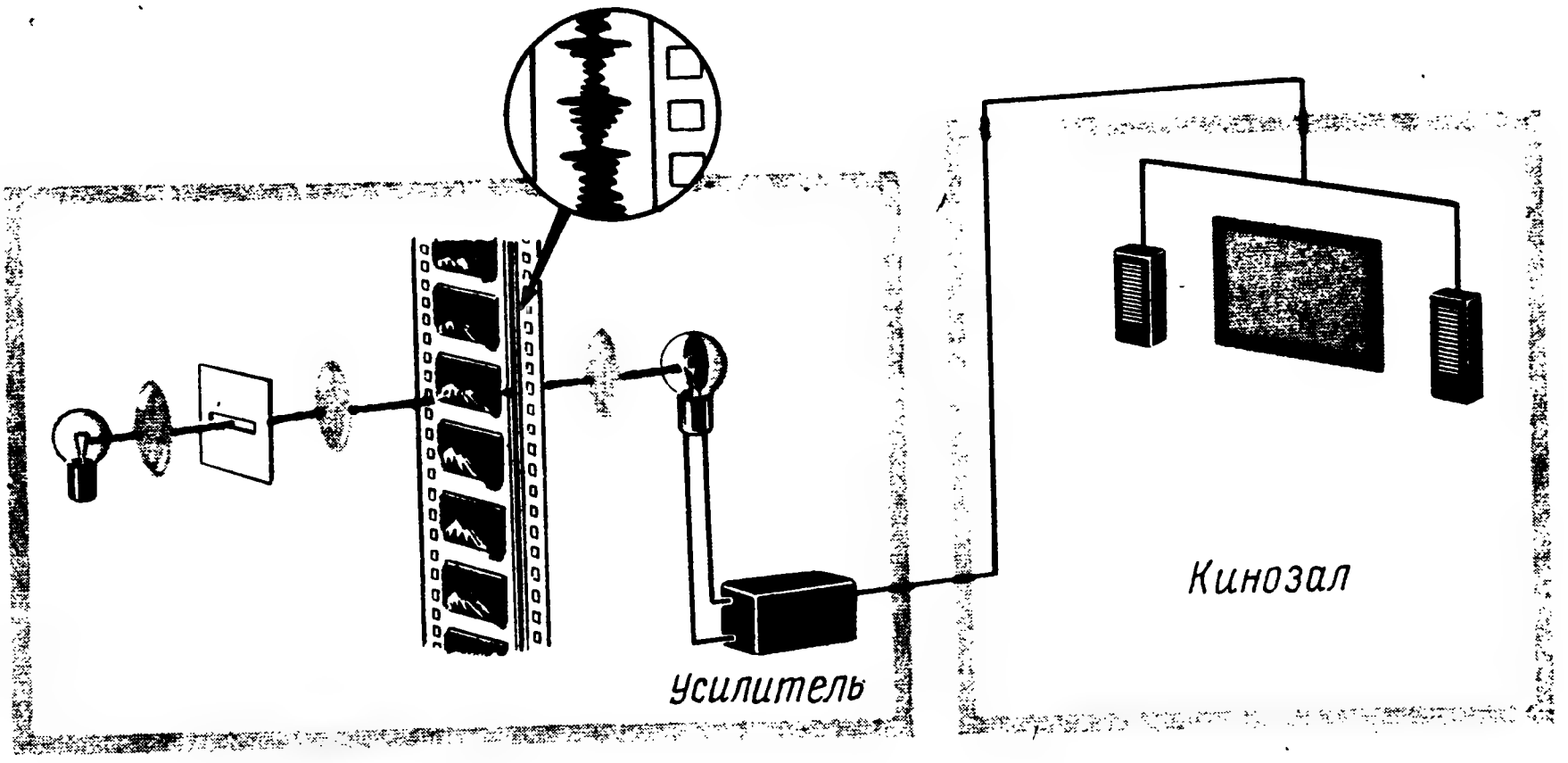


Рис. 246

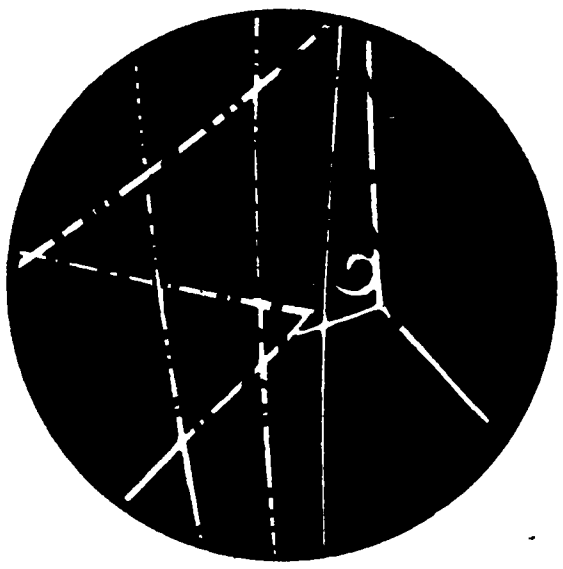
Пройдя сквозь нее, луч падает на фотоэлемент (рис. 246). При этом световой поток, попадающий на фотоэлемент, непрерывно изменяется. Поэтому в цепи фотоэлемента сила тока также меняется. Колебания тока сначала усиливаются до необходимой мощности, а затем уже поступают в репродукторы. Здесь колебания электрического тока снова превращаются в звук.

?

1. Какие факты свидетельствуют о наличии у света корпускулярных свойств?
2. В чем состоят основные законы фотоэффекта?
3. Чему равна постоянная Планка?
4. Как определить энергию, массу и импульс фотона, зная частоту колебаний света ν?
5. В каком случае давление света больше: при падении его на зеркальную поверхность или на черную?

УПРАЖНЕНИЕ 12

1. Нарисовать приблизительно график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света. Как с помощью такого графика определить постоянную Планка?
2. Найти абсолютный показатель преломления n среды, в которой свет с энергией фотона $E=4{,}4\cdot10^{-19}$ Дж имеет длину волны $\lambda=3\cdot10^{-5}$ см.
3. Определить значение кванта энергии E, соответствующего длине волны $\lambda=5\cdot10^{-7}$ м.
4. Определить длину волны λ света, которым освещается поверхность металла, если фотоэлектроны имеют кинетическую энергию $K=4{,}5\cdot10^{-20}$ Дж, а работа выхода электрона из металла $A=7{,}6\cdot10^{-19}$ Дж.
5. Какова красная граница ν_m фотоэффекта, если работа выхода электрона из металла $A=3{,}3\cdot10^{-19}$ Дж?
6. Излучение с длиной волны $\lambda=3\cdot10^{-5}$ см падает на вещество, для которого красная граница фотоэффекта $\nu_m=4{,}3\cdot10^{14}$ с$^{-1}$. Чему равна кинетическая энергия фотоэлектронов?
7. Каков импульс фотона, если длина световой волны $\lambda=5\cdot10^{-5}$ см?



АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

ВВЕДЕНИЕ

Открытие сложного строения атома — важнейший этап становления современной физики, наложивший отпечаток на все ее дальнейшее развитие. В процессе создания количественной теории строения атома, позволившей объяснить атомные спектры, были открыты новые законы движения микрочастиц — законы *квантовой механики.*

Модель Томсона. Не сразу ученые пришли к правильным представлениям о строении атома. Первая модель атома была предложена английским физиком Дж. Дж. Томсоном, открывшим электрон. По мысли Томсона, положительный заряд атома занимает весь объем атома и распределен в этом объеме с постоянной плотностью. Простейший атом — атом водорода — представляет собой положительно заряженный шар радиусом около 10^{-8} см, внутри которого находится электрон. У более сложных атомов в положительно заряженном шаре находится несколько электронов, так что атом подобен кексу, в котором роль изюминок играют электроны. Однако модель атома Томсона оказалась в полном противоречии с опытами по исследованию распределения положительного заряда в атоме.

Эти опыты, произведенные впервые великим английским физиком Эрнестом Резерфордом, сыграли столь большую роль в понимании строения атома, что на них стоит остановиться более подробно, чем это было сделано в курсе физики VII класса. Теперь вы лучше можете понять их смысл и значение.

Глава XI

АТОМНАЯ ФИЗИКА

§ 119. СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА

Опыты Резерфорда. Масса электронов в несколько тысяч раз меньше массы атомов. Так как атом в целом нейтрален, то, следовательно, основная масса атома приходится на его положительно заряженную часть.

Для экспериментального исследования распределения положительного заряда, а значит, и массы внутри атома Резерфорд предложил в 1906 г. применить зондирование атома с помощью α-частиц. Как вам известно из курса физики VII класса, эти частицы возникают при распаде радия и некоторых других элементов. Их масса примерно в 8000 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен по модулю удвоенному заряду электрона. Это не что иное, как полностью ионизированные атомы гелия. Скорость α-частиц очень велика: она составляет $^1/_{15}$ скорости света.

Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов. Электроны вследствие своей малой массы не могут заметно изменить траекторию α-частицы, подобно тому как комар в несколько десятков граммов при столкновении с автомобилем не в состоянии заметно изменить его скорость.

Рассеяние (изменение направления движения) α-частиц может вызвать только положительно заряженная часть атома. Таким образом, по рассеянию α-частиц можно определить характер распределения положительного заряда и массы внутри атома. Схема опытов Резерфорда показана на рисунке 247. Испускаемый радиоактивным препаратом пучок α-частиц выделялся диафрагмой и после этого падал на тонкую фольгу из исследуемого материала (золото, медь и др.). После рассеяния α-частицы попадали на экран, покрытый сернистым цинком. Столкновение каждой частицы с экраном сопровождалось вспышкой света (сцинтилляцией), которую можно было наблюдать в микроскоп.

При хорошем вакууме внутри прибора в отсутствие фольги на экране возникала полоска света, состоящая из сцинтилляций, вызванных тонким пучком α-частиц. Но когда на пути пучка помещалась фольга, α-частицы из-за рассеяния распределялись на большей площади экрана.

Модифицируя экспериментальную установку, схема которой дана на рисунке 247, Резерфорд попытался обнаружить отклонение α-частиц на большие углы. Совершенно неожиданно оказалось, что небольшое число α-частиц (примерно одна на две тыся-

чи) отклонилось на углы, большие 90° Позднее Резерфорд признался, что, предложив своим ученикам эксперимент по наблюдению рассеяния α-частиц на большие углы, он сам не верил в положительный результат. «Это почти столь же невероятно,— говорил Резерфорд,— как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд возвратился бы к вам и нанес вам удар».

В самом деле, предвидеть этот результат, считая положительный заряд распределенным по всему объему атома, было нельзя. При таком распределении положительный заряд не может создать достаточно интенсивное электрическое поле, способное отбросить α-частицу назад. Максимальная сила отталкивания определяется по закону Кулона:

$$F_{\text{макс}} = \frac{q_\alpha q}{4\pi\varepsilon_0 R^2},$$

где q_α — заряд α-частицы, q — положительный заряд атома, R — его радиус, ε_0 — электрическая постоянная. Электрическое поле равномерно заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля по мере приближения к центру шара. Поэтому, чем меньше радиус R, тем больше сила, отталкивающая α-частицы.

Определение размеров атомного ядра. Чтобы положительный заряд атома мог отбросить α-частицу назад, потенциальная энергия кулоновского отталкивания у границы положительного заряда атома должна равняться кинетической энергии α-частицы:

$$\frac{q_\alpha q}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} \qquad (11.1)$$

На расстоянии R, удовлетворяющем этому уравнению, α-частица останавливается и ее кинетическая энергия становится равной нулю.

При $R = 10^{-8}$ см из этого равенства вытекает, что q почти в сто тысяч раз превышает заряд электронов. Но нельзя допустить, что столь большой положительный заряд имеется внутри атома. Ведь тогда и число электронов, нейтрализующих положительный заряд, должно быть столь же огромным. Масса такого количества электронов в сотни раз превышала бы массу всего атома.

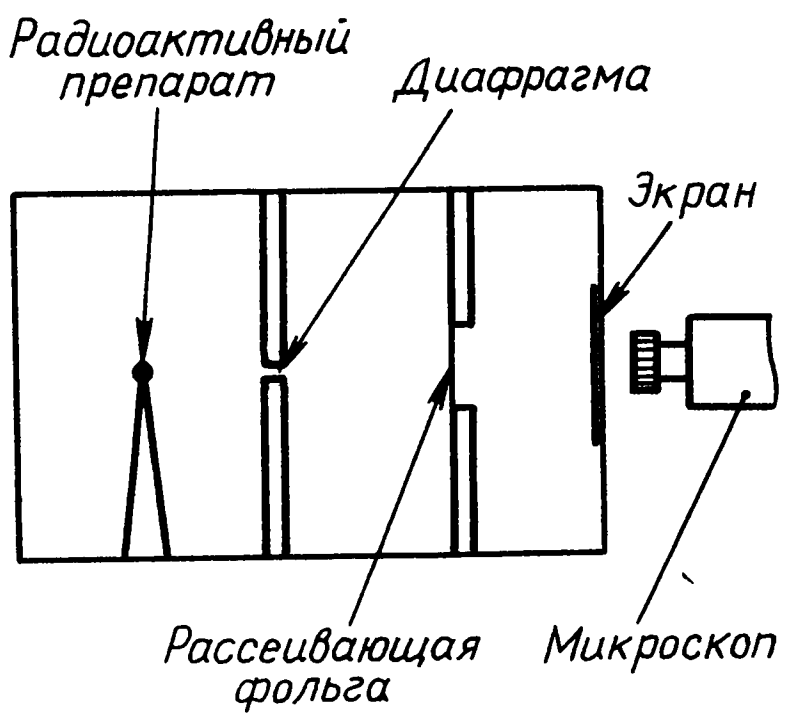


Рис. 247

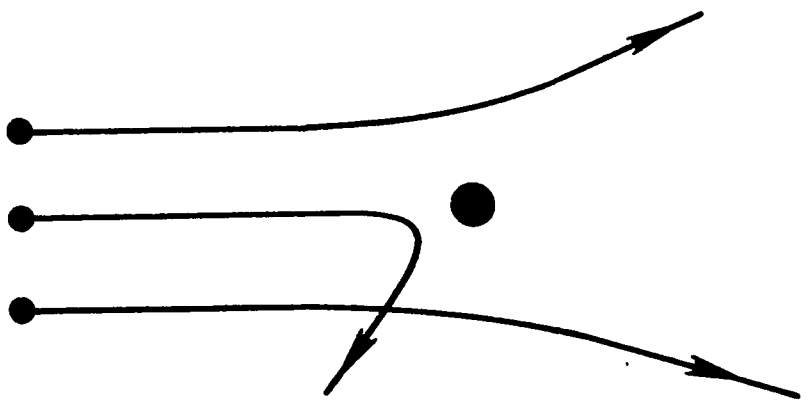
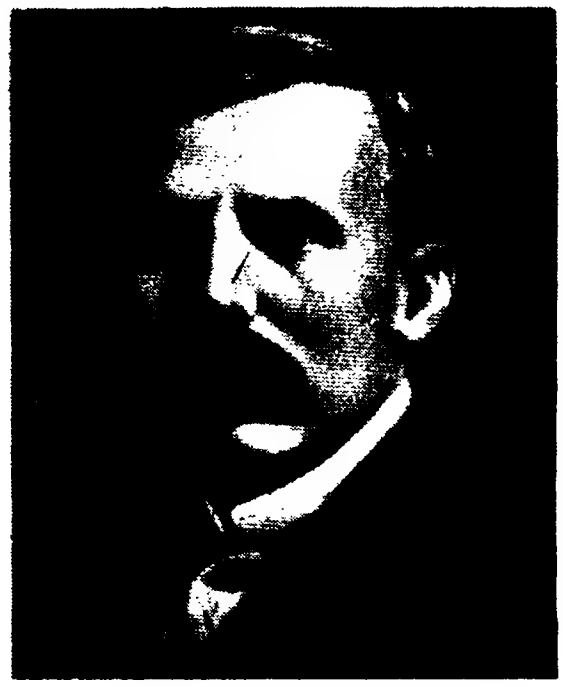


Рис. 248

Эрнест Резерфорд (1871—1937) — великий английский физик, уроженец Новой Зеландии. Своими экспериментальными открытиями Резерфорд заложил основы современного учения о строении атома и радиоактивности. Резерфорд открыл существование атомного ядра и впервые осуществил искусственное превращение атомных ядер. Все поставленные им опыты отличались исключительной простотой и ясностью.

Учениками Резерфорда были многие талантливые физики разных стран: Джеймс Чедвик (Англия), Нильс Бор (Дания), Петр Леонидович Капица (СССР) и др.



Очевидно, что α-частица могла быть отброшена назад лишь в том случае, если положительный заряд атома и его масса сконцентрированы в очень малой области пространства. Так **Резерфорд пришел к идее атомного ядра — тела малых размеров, в котором сконцентрированы почти вся масса и весь положительный заряд атома.**

На рисунке 248 показаны траектории α-частиц, пролетающих на различных расстояниях от ядра.

Подсчитывая число α-частиц, рассеянных на различные углы, Резерфорд смог оценить размеры ядра. Оказалось, что ядро имеет диаметр порядка 10^{-12}—10^{-13} см (у разных ядер диаметры различны). Впоследствии удалось определить и заряд ядра. При условии, что заряд электрона принят за единицу, заряд ядра в точности равен номеру данного химического элемента в таблице Менделеева.

§ 120. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

Из опытов Резерфорда непосредственно вытекает *планетарная модель атома.* В центре расположено положительно заряженное атомное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. В целом атом нейтрален. Поэтому число внутриатомных электронов, как и заряд ядра, равно порядковому номеру элемента в периодической системе. Ясно, что покоиться электроны внутри атома не могут, так как они упали бы на ядро. Они движутся вокруг ядра, подобно тому как планеты обращаются вокруг Солнца. Такой характер движения электронов определяется действием кулоновских сил со стороны ядра.

В атоме водорода вокруг ядра обращается всего лишь один электрон. Ядро атома водорода имеет положительный заряд, равный по модулю заряду электрона, и массу, примерно в 1836,1 раза большую массы электрона. Это ядро получило название *протона* и стало рассматриваться как элементарная частица. Размер атома — это радиус орбиты его электрона (рис. 249).

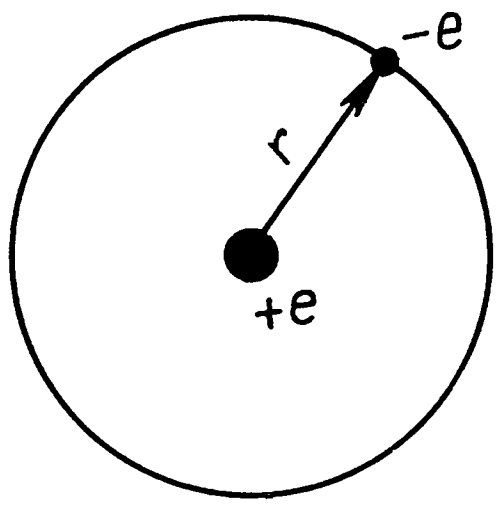


Рис. 249

Простая и наглядная планетарная модель атома имеет прямое экспериментальное обоснование. Она кажется совершенно необходимой для объяснения опытов по рассеянию α-частиц. Но эта модель совершенно не способна объяснить факт существования атома, его устойчивость. Ведь движение электронов по орбитам происходит с ускорением, причем весьма не малым. Ускоренно движущийся заряд по законам электродинамики Максвелла должен излучать электромагнитные волны с частотой, равной числу его оборотов вокруг ядра в секунду. Излучение сопровождается потерей энергии. Теряя энергию, электроны должны приближаться к ядру, подобно тому как спутник приближается к Земле при торможении в верхних слоях атмосферы. Как показывают совершенно строгие расчеты, основанные на механике Ньютона и электродинамике Максвелла, электрон за ничтожное время (порядка 10^{-8} с) должен упасть на ядро. Атом должен прекратить свое существование.

В действительности ничего подобного не происходит. Атомы устойчивы и в невозбужденном состоянии могут существовать неограниченно долго, совершенно не излучая электромагнитные волны.

Не согласующийся с опытом вывод о неизбежной гибели атома вследствие потери энергии на излучение — это результат применения законов классической физики к явлениям, происходящим внутри атома. Отсюда следует, что к явлениям атомных масштабов законы классической физики неприемлемы.

§ 121. ПОСТУЛАТЫ БОРА

Выход из крайне затруднительного положения был найден в 1913 г. великим датским физиком Нильсом Бором на пути дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе.

Эйнштейн оценивал проделанную Бором работу «как высшую музыкальность в области мысли», всегда его поражавшую. Основываясь на разрозненных опытных фактах, Бор с помощью гениальной интуиции правильно предугадал существо дела.

Последовательной теории атома Бор, однако, не дал. Он в виде постулатов сформулировал основные положения новой теории. Причем и законы классической физики не отвергались им безоговорочно. Новые постулаты скорее налагали лишь некоторые ограничения на допускаемые классической физикой движения.

Успех теории Бора был тем не менее поразительным, и всем ученым стало ясно, что Бор нашел правильный путь развития

Нильс Бор (1885—1962) — великий датский физик. Создал первую квантовую теорию атома и затем принял самое активное участие в разработке основ квантовой механики. Наряду с этим Бор внес большой вклад в теорию атомного ядра и ядерных реакций.

В Копенгагене Бор создал большую интернациональную школу физиков и много сделал для развития сотрудничества между физиками всего мира.

теории. Этот путь привел впоследствии к созданию стройной теории движения микрочастиц — квантовой механики.

Первый постулат Бора гласит: **атомная система может находиться только в особых стационарных, или квантовых. состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n. В стационарном состоянии атом не излучает.**

Этот постулат находится в явном противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущихся электронов может быть любой. Противоречит он и электродинамике Максвелла, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн.

Согласно второму постулату Бора **излучение света происходит при переходе атома из стационарного состояния с бóльшей энергией E_k в стационарное состояние с меньшей энергией E_n. Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний:**

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \qquad (11.2)$$

Отсюда можно частоту излучения выразить так:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \qquad (11.3)$$

При поглощении света атом переходит из стационарного состояния с меньшей энергией в стационарное состояние с большей энергией.

Второй постулат также противоречит электродинамике Максвелла, так как согласно этому постулату частота излученного света свидетельствует не об особенностях движения электрона, а лишь об изменении энергии атома.

§ 122. МОДЕЛЬ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

Свои постулаты Бор применил для построения теории простейшей атомной системы — атома водорода.

Основная задача состояла в нахождении частот электромагнитных волн, излучаемых водородом. Эти частоты можно найти

на основе второго постулата, если располагать правилом определения стационарных значений энергии атома. Это правило Бору опять-таки пришлось постулировать.

Энергия и радиусы орбит стационарных состояний. Бор рассматривал простейшие круговые орбиты. Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром определяется формулой

$$П = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r},$$

где e — модуль заряда электрона, а r — расстояние от электрона до ядра. Произвольная постоянная, с точностью до которой определяется потенциальная энергия, здесь принята равной нулю. Потенциальная энергия отрицательна, так как взаимодействующие частицы имеют заряды противоположных знаков.

Полная энергия E атома согласно механике Ньютона равна сумме кинетической и потенциальной энергий:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Между скоростью электрона и радиусом его орбиты существует связь, вытекающая из второго закона Ньютона. Центростремительное ускорение $\frac{v^2}{r}$ сообщает электрону на орбите кулоновская сила. Поэтому

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2},$$

или

$$mrv^2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}. \qquad (11.5)$$

Подставляя значение скорости, найденное из этого соотношения, в формулу (11.4), получим:

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}. \qquad (11.6)$$

По классической механике радиус орбиты может принимать любые значения. Следовательно, любые значения может принимать и энергия.

Но по первому постулату Бора энергия может принимать только определенные значения E_n. Поэтому согласно (11.6) и радиусы орбит в атоме водорода не могут быть произвольными. Правило квантования Бора устанавливает возможные радиусы орбит и соответственно возможные значения энергии в атоме.

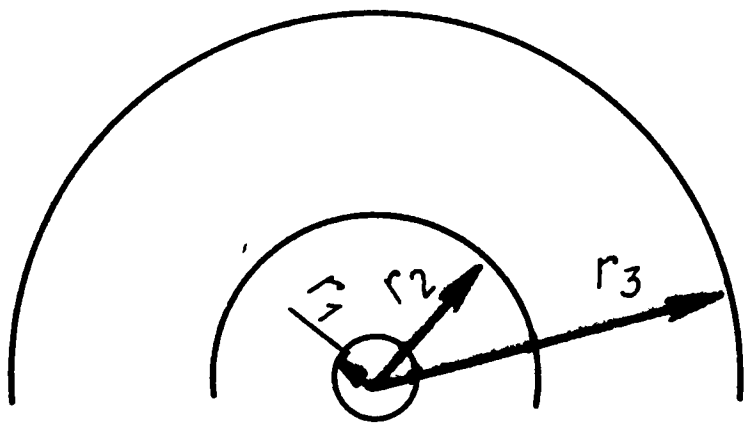


Рис. 250

При движении электрона по круговой орбите модуль его импульса mv и радиус орби-

ты r остаются неизменными. Следовательно, постоянной будет и величина mvr. В механике эта величина называется моментом импульса. Бор обратил внимание на то, что наименование постоянной Планка совпадает с наименованием момента импульса:

$$\text{Дж}\cdot\text{с} = \frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}\ \text{м}.$$

Будучи уверенным в том, что постоянная $\hbar$ должна играть основную роль в теории атома, Бор предположил, что произведение модуля импульса на радиус орбиты кратно постоянной Планка $\hbar$:

$$mvr = n\hbar,$$

где $n = 1, 2, 3, \ldots$. Это и есть *правило квантования.*

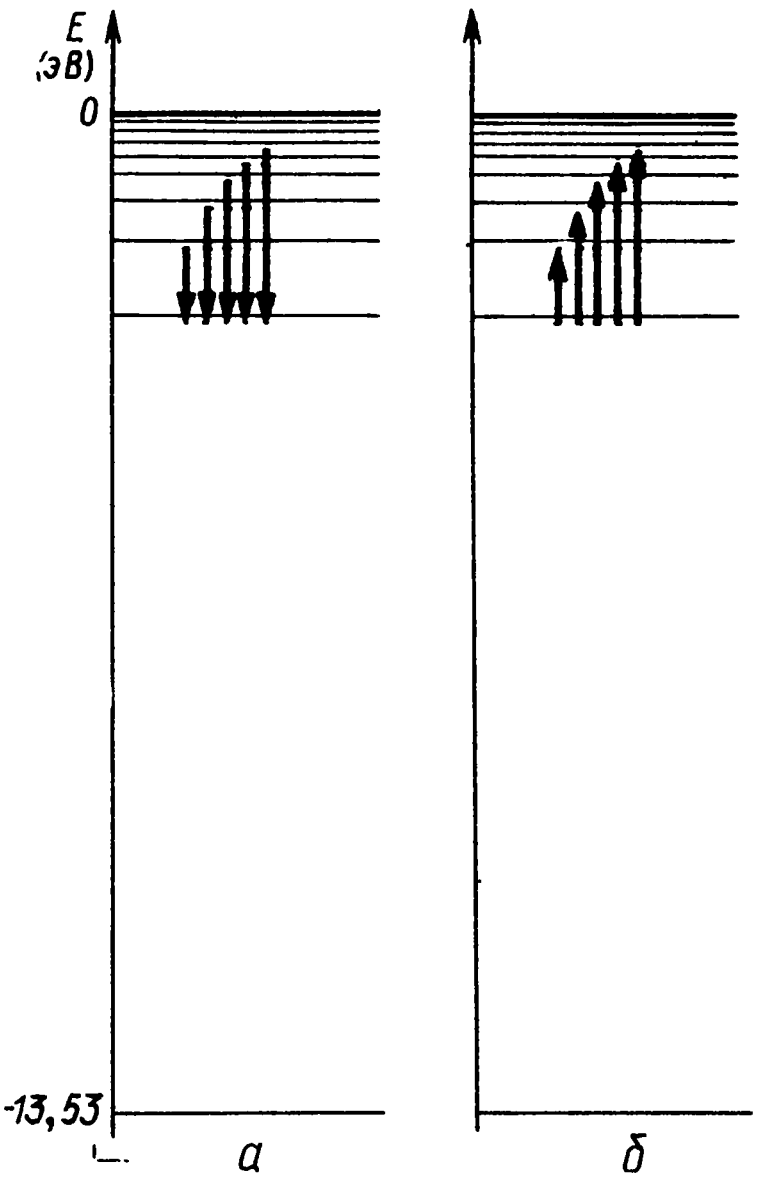


Рис. 251

С его помощью можно исключить скорость из формулы (11.5) и получить выражение для возможных радиусов орбит:

$$r_n = 4\pi\varepsilon_0 \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}. \qquad (11.7)$$

Радиусы боровских орбит меняются дискретно с изменением числа n (рис. 250). Постоянная Планка, масса и заряд электрона определяют возможные значения электронных орбит. Учитывая, что масса электрона $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг, находим наименьший радиус орбиты:

$$r_1 = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{me^2} = 5\cdot 10^{-11}\ \text{м}. \qquad (11.8)$$

Это и есть как раз радиус атома. Теория Бора дает для него правильное значение. Размеры атома определяются квантовыми законами (радиус пропорционален квадрату постоянной Планка). Классическая теория не может объяснить, почему атом имеет размеры порядка 10^{-11} м.

Подставляя выражение для радиусов орбит (11.7) в формулу (11.6), получим значения энергий стационарных состояний атома (энергетические уровни):

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\ \frac{me^4}{2\,\hbar^2 n^2}. \qquad (11.9)$$

На рисунках 251, *а* и 251, *б* эти значения энергии отложены на вертикальных осях. В низшем энергетическом состоянии ($n=1$)

$$E_1 = -\frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{2\hbar^2} = -21{,}68\cdot10^{-19}\ \text{Дж} = -13{,}53\ \text{эВ}.$$

В этом состоянии атом может находиться сколь угодно долго. Для того чтобы ионизовать атом водорода, ему нужно сообщить энергию 13,53 эВ. Эта энергия называется *энергией ионизации.*

Все состояния с $n=2, 3, 4, \ldots$ соответствуют возбужденному атому. Время жизни в этих состояниях имеет порядок 10^{-8} с. За это время электрон успевает совершить около ста миллионов оборотов вокруг ядра.

Излучение света. Согласно второму постулату Бора возможные частоты излучения атома водорода определяются формулой

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)^2}\frac{me^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{k^2}\right) = R\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{k^2}\right), \quad (11.10)$$

где $R = \dfrac{me^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2\cdot 4\pi\hbar^3}$ — постоянная величина, определяемая через постоянную Планка, массу и заряд электрона.

Теория Бора приводит к количественному согласию с экспериментом для частот, излучаемых атомом водорода. Все частоты излучений атома водорода образуют ряд серий, каждой из которых соответствуют определенное значение числа n и различные значения числа $k>n$.

Излучение частот данной серии происходит при переходах с высших энергетических уровней на один из низших. Переходы в первое возбужденное состояние (на второй энергетический уровень) с верхних уровней образуют *серию Бальмера.* На рисунке 251, *а* эти переходы изображены стрелками. Красная, зеленая и две синие линии в видимой части спектра водорода (рис. V на цветной вклейке) соответствуют переходам

$$E_3 \to E_2,\ E_4 \to E_2,\ E_5 \to E_2 \text{ и } E_6 \to E_2.$$

Данная серия названа по имени швейцарского учителя Я. Бальмера, который еще в 1885 г. на основе эксперимента установил, что частоты видимой части спектра водорода удовлетворяют соотношению

$$\nu = R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{k^2}\right),$$

где R — постоянный коэффициент.

Поглощение света. Поглощение света — процесс, обратный излучению. Атом, поглощая свет, переходит из низших энергетических состояний в высшие. При этом он поглощает те же самые частоты, которые излучает, переходя из высших энергетических состояний в низшие. На рисунке 251, *б* стрелками изображены переходы атома из одних состояний в другие с поглощением света.

§ 123. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ

Успехи теории атома водорода были получены ценой отказа от фундаментальных положений классической механики, которая на протяжении более 200 лет считалась безусловно справедливой. Поэтому большое значение имело прямое экспериментальное доказательство справедливости постулатов Бора, особенно первого постулата о существовании стационарных состояний. Второй постулат можно рассматривать как следствие закона сохранения энергии и гипотезы о реальности фотонов.

Существование стационарных состояний было доказано в опытах немецких физиков Д. Франка и Г. Герца в 1913 г. Идея опытов такова: для обнаружения стационарных состояний нужно исследовать поведение атома при передаче ему определенных количеств энергии. Если стационарных состояний нет, т. е. если внутренняя энергия атома может принимать любые значения, то, передавая атому некоторое количество энергии, мы обязательно возбудим атом, т. е. увеличим его внутреннюю энергию. Если же стационарные состояния есть, то для увеличения внутренней энергии ему нужно передать энергию, превышающую разность энергий двух низших стационарных состояний. При передаче меньшей энергии атом не возбуждается и передаваемая ему энергия увеличивает лишь кинетическую энергию атома как целого.

Проще всего передавать атомам определенную энергию, бомбардируя их электронами, ускоренными электрическим полем. Пройдя разность потенциалов U, электрон приобретает кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

Схема экспериментальной установки Франка и Герца показана на рисунке 252. Стеклянный сосуд с тремя электродами заполнен парами ртути при низком давлении. Батарея $Б_1$ создает ускоряющее электрическое поле. Напряжение U между катодом K и сеткой C можно регулировать с помощью потенциометра. Между сеткой и анодом с помощью батареи $Б_2$ создается слабое задерживающее поле с напряжением около 0,5 В. Это

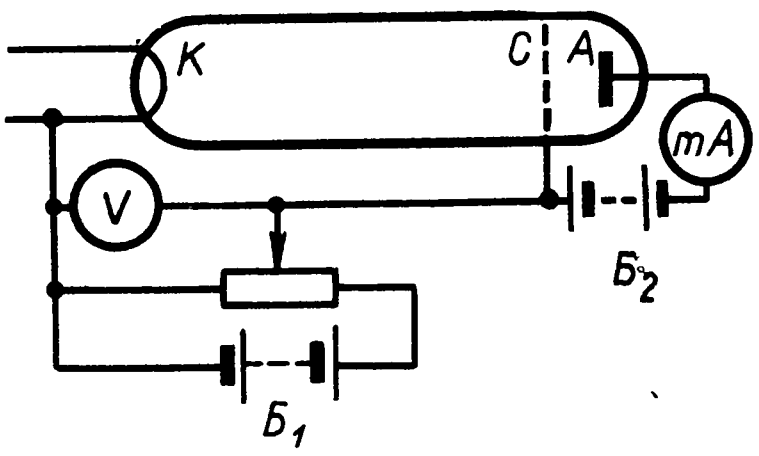


Рис. 252

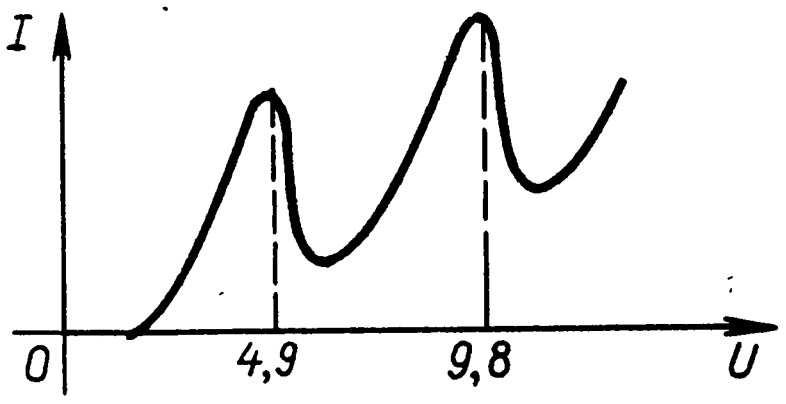


Рис. 253

поле препятствует попаданию на анод медленных электронов. Испускаются электроны катодом K, подогреваемым электрическим током.

Экспериментально определяется зависимость силы тока I в анодной цепи от напряжения U. Полученная кривая изображена на рисунке 253. Сила тока достигает первого максимума при напряжении 4,9 В. Затем следует резкий спад силы тока. Следующий максимум получается при напряжении 9,8 В и т. д. Объяснить такую зависимость I от U можно лишь наличием стационарных состояний у атомов ртути.

При напряжении ниже 4,9 В столкновения электронов с атомами являются упругими. Внутренняя энергия атомов не меняется. Кинетическая энергия электронов при этом почти не меняется, так как масса электрона много меньше массы атомов ртути. В результате электроны, ускоренные электрическим полем между катодом и сеткой, преодолевают задерживающее поле и достигают анода. Число электронов, достигших анода в единицу времени, растет пропорционально напряжению.

Когда напряжение повышается до 4,9 В, столкновения электронов с атомами становятся неупругими. Внутренняя энергия атомов увеличивается скачком, а электрон после соударения теряет почти всю свою кинетическую энергию. Задерживающее поле не допускает медленные электроны до анода, и сила тока резко уменьшается. Ток не падает до нуля лишь потому, что некоторая часть электронов достигает сетки, не испытав неупругих соударений.

Необходимую для неупругого соударения энергию электрон приобретает, только достигая сетки после прохождения разности потенциалов 4,9 В. Отсюда следует, что *внутренняя энергия атомов ртути не может измениться на величину, меньшую* $\Delta E = 4{,}9$ эВ. Таким образом, внутренняя энергия атома не может принимать произвольные значения и не может изменяться на произвольные значения: это служит подтверждением существования у атома дискретного набора *стационарных состояний*[1]

Справедливость этого вывода подтверждается еще и тем, что при напряжении 4,9 В пары ртути начинают излучать. Частота излучения, вычисленная по формуле

$$\nu = \frac{\Delta E}{h},$$

совпадает с экспериментально наблюдаемой. Это означает, что возбужденные атомы ртути переходят затем в низшее энергетическое состояние и излучают световые кванты в соответствии со вторым постулатом Бора.

---

[1] Второй максимум кривой, приведенной на рисунке 253, получается из-за того, что при напряжении 9,8 В электроны на пути к сетке дважды испытывают неупругие соударения.

§ 124. ТРУДНОСТИ ТЕОРИИ БОРА. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Наибольший успех теория Бора имела применительно к атому водорода, для которого оказалось возможным построить количественную теорию спектра.

Однако построить количественную теорию для следующего за водородом атома гелия на основе боровских представлений не удалось. Относительно атомов гелия и более сложных атомов теория Бора позволяла делать лишь качественные (хотя и очень важные) заключения.

Это не удивительно. Теория Бора является половинчатой, внутренне противоречивой. С одной стороны, как мы видели, при построении теории атома водорода используются обычные законы механики Ньютона и давно известный закон Кулона, а с другой — вводятся квантовые постулаты, никак не связанные с механикой Ньютона и электродинамикой Максвелла. Введение в физику квантовых представлений требовало радикальной перестройки механики и электродинамики. Эта перестройка была осуществлена в начале второй четверти нашего века, когда были созданы новые физические теории: квантовая механика и квантовая электродинамика.

Постулаты Бора оказались совершенно правильными. Но они уже выступали не как постулаты, а лишь как следствия основных принципов этих теорий; правило же квантования Бора оказалось приближенным следствием, применимым далеко не всегда.

Представление об определенных орбитах, по которым движется электрон в атоме Бора, оказалось весьма условным. На самом деле движение электрона в атоме имеет очень мало общего с движением планет по орбитам. Если бы атом водорода в наинизшем энергетическом состоянии можно было бы сфотографировать с большой выдержкой, то мы увидели бы облако с максимальной плотностью на определенном расстоянии от ядра. Это расстояние можно принять за грубое подобие радиуса орбиты. Оно как раз и совпадает с боровским радиусом (11.8). Фотография атома совсем не походила бы на привычный рисунок солнечной системы, а скорее напоминала бы расплывчатое пятно, полученное при фотографировании бабочки, беспорядочно толкущейся вокруг фонаря [1]. В настоящее время с помощью квантовой механики можно ответить на любой вопрос, касающийся строения и свойств электронных оболочек атомов. Но количественная теория оказывается весьма сложной, и мы ее касаться не будем. Качественное описание электронных оболочек атомов имеется в курсе «Неорганической химии».

§ 125. КВАНТОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА — ЛАЗЕРЫ

Индуцированное излучение. В 1917 г. Эйнштейн предсказал возможность так называемого *индуцированного* (вынужденного) излучения света атомами. Под индуцированным излучением понимается излучение возбужденных атомов под действием падающего на них света. Замечательной особенностью этого излучения является то, что возникшая при индуцированном излучении световая волна не отличается от волны, падающей на атом, ни частотой, ни фазой, ни поляризацией.

На языке квантовой теории вынужденное излучение означает переход атома из высшего энергетического состояния в низшее, но не самопроизвольно, как при обычном излучении, а под влиянием внешнего воздействия.

Лазеры. Еще в 1940 г. советский физик В. А. Фабрикант указал на возможность использования явления вынужденного излучения для усиления электромагнитных волн. В 1954 г. советские ученые Н. Г. Басов и

---

[1] Здесь нужно иметь в виду сходство картин только в среднем, за сравнительно большое время выдержки. Движение электрона никак нельзя отождествить с порханием бабочки, равно как и с движением любого другого макроскопического тела.

А. М. Прохоров и независимо от них американский физик Ч. Таунс использовали явление индуцированного излучения для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны $\lambda = 1{,}27$ см. За разработку нового принципа генерации и усиления радиоволн Н. Г. Басову и А. М. Прохорову была в 1959 г. присуждена Ленинская премия. В 1963 г. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

В 1960 г. в США был создан первый *лазер*[1] — квантовый генератор электромагнитных волн в видимом диапазоне спектра.

Свойства лазерного излучения. Лазерные источники света обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими источниками света:

1. Лазеры способны создавать очень узкие пучки света с углом расхождения около 10^{-5} рад. На Луне такой пучок, испущенный с Земли, дает пятно диаметром 3 км.

2. Свет лазера обладает исключительной монохроматичностью. В отличие от обычных источников света, атомы которых излучают свет независимо друг от друга, в лазерах атомы излучают свет согласованно. Поэтому фаза волны не испытывает нерегулярных изменений.

3. Лазеры являются самыми мощными источниками света. В узком интервале спектра кратковременно (10^{-11} с) достигается мощность излучения 10^{12}—10^{13} Вт с одного квадратного сантиметра, в то время как мощность излучения Солнца с квадратного сантиметра равна только $7 \cdot 10^3$ Вт, причем суммарно по всему спектру. На узкий же интервал $\Delta\lambda = 10^{-6}$ см (ширина спектральной линии лазера) приходится у Солнца всего лишь 0,2 Вт/см^2. Напряженность электрического поля в электромагнитной волне, излучаемой лазером, составляет 10^{10}—10^{12} В/см; она превышает напряженность поля внутри атома.

Принцип действия лазеров. В обычных условиях большинство атомов находится в низшем энергетическом состоянии. Поэтому при низких температурах вещества не светятся.

При прохождении электромагнитной волны сквозь вещество происходит поглощение электромагнитной энергии. Под действием энергии волны часть

---

[1] Лазер — термин, возникший от сокращения английской фразы Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света при помощи индуцированного излучения).

Рис. 254

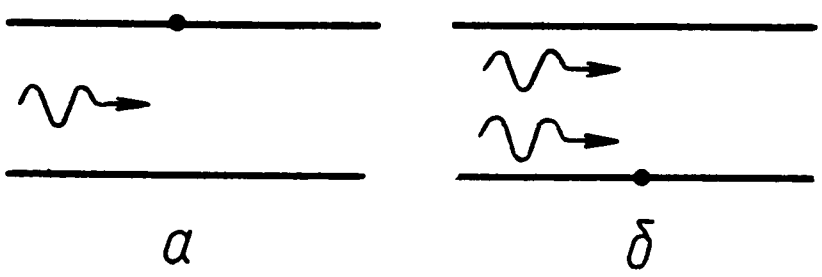


Рис. 255

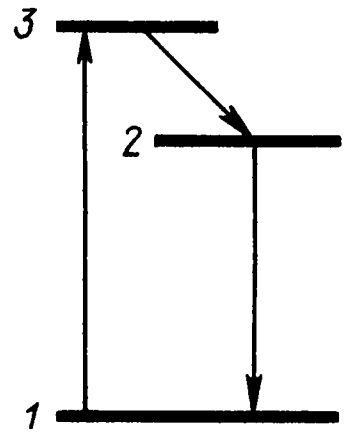


Рис. 256

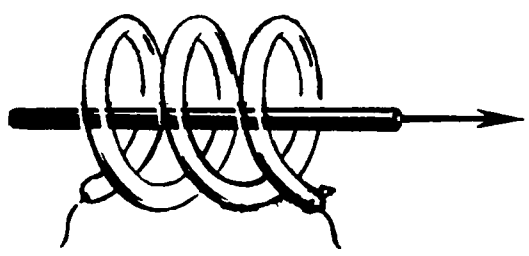


Рис. 257

атомов возбуждается, т. е. переходит в высшее энергетическое состояние. При этом от светового пучка отнимается энергия $h\nu = E_2 - E_1$, равная разности энергий между уровнями E_2 и E_1. На рисунке 254, *а* схематически представлены невозбужденный атом и электромагнитная волна в виде отрезка синусоиды. Электрон находится на нижнем уровне. На рисунке 254, *б* изображен возбужденный атом, поглотивший энергию. Возбужденный атом может отдать свою энергию соседним атомам при столкновении или испустить фотон в любом направлении.

Теперь представим себе, что каким-либо способом мы возбудили бо́льшую часть атомов среды. Тогда при прохождении через вещество электромагнитной волны с частотой

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

эта волна будет не ослабляться, а, напротив, усиливаться за счет индуцированного излучения. Под ее воздействием атомы согласованно переходят в низшие энергетические состояния, излучая волны, совпадающие по частоте и фазе с падающей волной. На рисунке 255, *а* показаны возбужденный атом и волна, а на рисунке 255, *б* схематически показано, что атом перешел в основное состояние, а волна усилилась.

Трехуровневая система. Существуют различные методы получения среды с возбужденными состояниями атомов. В рубиновом лазере для этого используется специальная мощная лампа. Атомы возбуждаются за счет поглощения света.

Но двух уровней энергии для работы лазера недостаточно. Каким бы мощным ни был свет лампы, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. Ведь свет одновременно и возбуждает атомы и вызывает индуцированные переходы с верхнего уровня на нижний.

Выход был найден в использовании трех энергетических уровней (общее число уровней всегда велико; но речь идет о «работающих» уровнях). На рисунке 256 изображены три энергетических уровня. Существенно, что в отсутствие внешнего воздействия время, в течение которого система находится в различных энергетических состояниях («время жизни»), весьма неодинаково. На уровне *3* система живет очень мало, порядка 10^{-8} с, после чего самопроизвольно переходит в состояние *2* без излучения света. (Энергия при этом передается кристаллической решетке.) Время жизни в состоянии *2* в 100 000 раз больше, т. е. составляет около 10^{-3} с. Переход из состояния *2* в состояние *1* под действием внешней электромагнитной волны сопровождается излучением, что и используется в лазерах. После вспышки мощной лампы система переходит в состояние *3* и спустя промежуток времени около 10^{-8} с оказывается в состоянии *2*, в котором живет сравнительно долго. Таким образом и создается «перенаселенность» возбужденного уровня *2* по сравнению с невозбужденным уровнем *1*. Необходимые энергетические уровни имеются в кристаллах рубина. Рубин — это ярко-красный кристалл окиси алюминия Al_2O_3 с примесью атомов хрома (около 0,05%). Именно уровни ионов хрома в кристалле обладают требуемыми свойствами.

Устройство рубинового лазера. Из кристалла рубина изготовляется стержень с плоскопараллельными торцами. Газоразрядная лампа, имеющая форму спирали (рис. 257), дает сине-зеленый свет. Кратковременный импульс тока от батареи конденсаторов емкостью в несколько тысяч микрофарад вызывает яркую вспышку лампы. Спустя малое время энергетический уровень *2* становится «перенаселенным».

В результате самопроизвольных переходов $2 \to 1$ начинают излучаться волны всевозможных направлений. Те из них, которые идут под углом к оси кристалла, выходят из него и не играют в дальнейших процессах никакой роли. Но волна, идущая вдоль оси кристалла, многократно отражается от его торцов. Она вызывает индуцированное излучение возбужденных ионов хрома и быстро усиливается.

Один из торцов рубинового стержня является зеркальным, другой торец делается полупрозрачным. Через него выходит мощный кратковременный

(длительностью около сотни микросекунд) импульс красного света, обладающий теми феноменальными свойствами, о которых было рассказано в начале параграфа. Волна является когерентной, так как все атомы излучают согласованно, и очень мощной, так как при индуцированном излучении вся запасенная энергия выделяется за очень малое время.

Другие типы лазеров. Рубиновый лазер, с которым мы познакомились, работает в импульсном режиме. Существуют также лазеры непрерывного действия.

В газовых лазерах этого типа рабочим веществом является газ. Атомы рабочего вещества возбуждаются электрическим разрядом.

Применяются и полупроводниковые лазеры непрерывного действия. Они созданы впервые в нашей стране. В них энергия для излучения заимствуется от электрического тока.

Созданы очень мощные газодинамические лазеры непрерывного действия на 150 кВт. В этих лазерах «перенаселенность» верхних энергетических уровней создается при расширении и адиабатическом охлаждении сверхзвуковых газовых потоков, нагретых до нескольких тысяч градусов.

Применение лазеров. Очень перспективно применение лазерного луча для связи, особенно в космическом пространстве, где нет поглощающих свет облаков.

Огромная мощность лазерного луча используется для испарения материалов в вакууме, для сварки и т. д. С помощью луча лазера можно производить хирургические операции, например «приваривать» отслоившуюся от глазного дна сетчатку.

С помощью лазеров получают объемные изображения предметов, используя когерентность лазерного луча (так называемая *голография*).

Лазеры позволили осуществить *«светолокатор»,* с помощью которого расстояние до движущихся предметов измеряется с огромной точностью, недоступной для обычных локаторов.

Возбуждая лазерным излучением атомы или молекулы, можно вызвать химические реакции между ними, которые в обычных условиях не идут.

В настоящее время лазеры получили столь разнообразные и многочисленные применения, что и перечислить их здесь не представляется возможным.

?

1. Почему отрицательно заряженные частицы атома не оказывают заметного влияния на рассеяние α-частиц?
2. Почему α-частицы не могли бы рассеиваться на большие углы, если бы положительный заряд атома был распределен по всему его объему?
3. Планетарная модель атома не согласуется с законами классической физики. Почему?
4. В чем состоят постулаты Бора?
5. Чем отличается излучение лазера от излучения лампы накаливания?

УПРАЖНЕНИЕ 13

1. Во сколько раз меняются радиус орбиты и энергия атома водорода при переходе из состояния с номером $k=5$ в состояние с номером $n=1$?
2. Каковы скорость v и ускорение a электрона на первой боровской орбите?
3. На какое минимальное расстояние r_m сблизятся при центральном ударе α-частица и ядро олова? Скорость α-частицы равна 10^9 см/с, ее масса $6{,}7 \cdot 10^{-24}$ г. Ядро олова считать неподвижным.
4. Определить длину волны λ света, испускаемого атомом водорода при его переходе из стационарного состояния с номером $k=4$ в состояние с номером $n=2$.
5. Определить минимальную длину волны в серии Бальмера.

Глава XII

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

§ 126. АТОМНОЕ ЯДРО И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Слова *атомное ядро* и *элементарные частицы* уже неоднократно упоминались. Вся атомная физика посвящена исследованию взаимодействия различных ядер с электронами.

Первоначально разделения на *ядерную физику* и *физику элементарных частиц* не было. С многообразием мира элементарных частиц физики столкнулись при изучении ядерных процессов. Выделение физики элементарных частиц в самостоятельную область исследования произошло сравнительно недавно, около 1950 г. Теперь мы имеем два самостоятельных раздела физики: один из них занимается структурой и превращениями атомных ядер, а другой — природой, свойствами и взаимными превращениями элементарных частиц. Однако в отношении рассматриваемых проблем и применяемых методов исследования у них сохранилось много общего.

Бóльшую часть времени мы посвятим основным вопросам ядерной физики и лишь в конце кратко остановимся на свойствах элементарных частиц. Но сначала познакомимся с устройствами, которые вообще сделали возможным возникновение и развитие физики атомного ядра и элементарных частиц. Это устройства для регистрации и изучения столкновений и взаимных превращений ядер и элементарных частиц. Именно они дают необходимую информацию о событиях в микромире.

§ 127. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Любое устройство, регистрирующее элементарные частицы или движущиеся атомные ядра, подобно заряженному ружью со взведенным курком. Небольшое усилие при нажатии на спусковой крючок ружья вызывает эффект, несравнимый с затраченным усилием,— выстрел.

Регистрирующий прибор — это более или менее сложная макроскопическая система, которая может находиться в неустойчивом состоянии. При небольшом возмущении, вызванном пролетевшей частицей, начинается процесс перехода системы в новое, более устойчивое состояние. Этот процесс и позволяет регистрировать частицу. В настоящее время используется много различных методов регистрации частиц.

В зависимости от целей эксперимента и условий, в которых он проводится, применяются те или иные регистрирующие уст-

ройства, отличающиеся друг от друга по основным характеристикам. К последним относятся: эффективность (отношение количества зарегистрированных частиц к числу частиц, попавших в прибор), минимальное время регистрации (время, за которое прибор после регистрации очередной частицы возвращается в исходное, рабочее состояние), точность измерения энергии, массы, заряда частиц и т. д.

Мы ограничимся кратким описанием устройств, применяемых наиболее широко при исследовании элементарных частиц и в ядерной физике. С простейшим методом регистрации — подсчетом сцинтилляций — вы уже знакомы.

Газоразрядный счетчик Гейгера. Счетчик Гейгера — один из важнейших приборов для автоматического счета частиц. Хорошие счетчики позволяют регистрировать до 10 000 и более частиц в секунду. Счетчик (рис. 258) состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем (катод), и тонкой металлической нити, идущей вдоль оси трубки (анод). Трубка заполняется газом, обычно аргоном. Действие счетчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица (электрон, α-частица и т. д.), пролетая в газе, отрывает от атомов электроны и создает положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между анодом и катодом (к ним подводится высокое напряжение) ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает лавина ионов, и ток через счетчик резко возрастает. При этом на сопротивлении нагрузки R образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство.

Для того чтобы счетчик смог регистрировать следующую попавшую в него частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Это происходит автоматически. Так как в момент появления импульса тока на сопротивлении нагрузки R возникает большое падение напряжения, то напряжение между анодом и катодом резко уменьшается — настолько, что разряд прекращается.

Счетчик Гейгера применяется в основном для регистрации электронов и γ-квантов (фотонов большой энергии). Однако непосредственно γ-кванты вследствие их малой ионизирующей способности не регистрируются. Для их обнаружения внутреннюю стенку трубки покрывают материалом, из которого γ-кванты выбивают электроны. При регистрации электронов эффективность счетчика порядка 100%, а при регистрации γ-квантов — лишь около 1%.

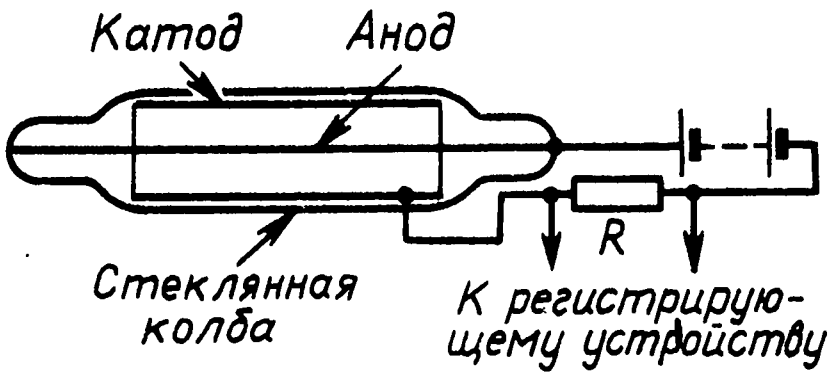


Рис. 258

Регистрация тяжелых частиц (например, α-частиц) затруднена, так как сложно сделать в счетчике достаточно тонкое «окошко», прозрачное для этих частиц.

В настоящее время созданы счетчики, работающие на иных принципах, чем счетчик Гейгера.

Камера Вильсона. Счетчики позволяют лишь регистрировать факт прохождения через них частицы и фиксировать некоторые ее характеристики. В камере же Вильсона быстрая заряженная частица оставляет след, который можно наблюдать непосредственно или фотографировать. Этот прибор можно назвать «окном» в микромир.

Действие камеры Вильсона, созданной в 1912 г., основано на конденсации пересыщенного пара на ионах, образующихся в рабочем объеме камеры вдоль траектории заряженной частицы.

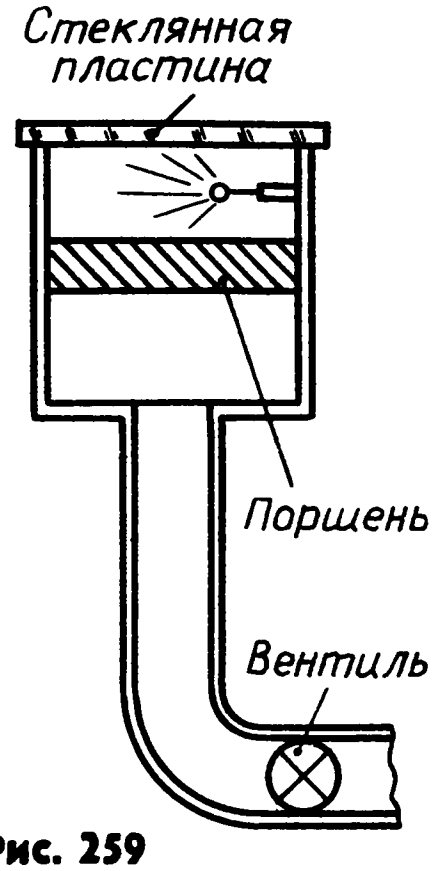


Рис. 259

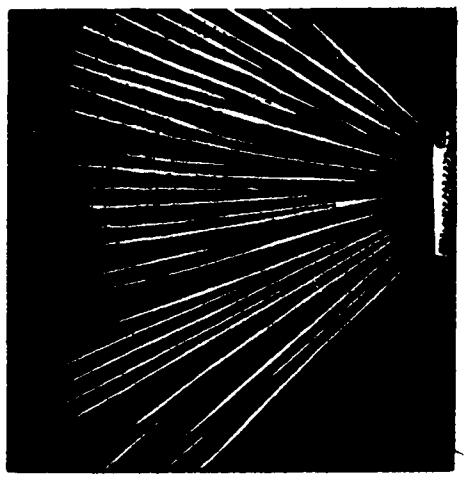


Рис. 260

Камера Вильсона представляет собой герметически закрытый сосуд, заполненный парами воды или спирта, близкими к насыщению (рис. 259). При резком опускании поршня, вызванном уменьшением давления под поршнем, пар в камере адиабатически расширяется. Вследствие этого происходит охлаждение и пар становится пересыщенным. Это неустойчивое состояние пара. Если частица проникает в камеру непосредственно перед расширением или после него, то ионы, которые она образует, будут действовать как центры конденсации. Возникающие на них капельки воды образуют след пролетевшей частицы — *трек* (рис. 260). Затем камера возвращается в исходное состояние и ионы удаляются электрическим полем. Перед очередным расширением это поле снимается. В зависимости от размеров камеры время восстановления рабочего режима колеблется от нескольких секунд до десятков минут.

Информация, которую дают треки в камере Вильсона, значительно богаче той, которую могут дать счетчики. По длине трека можно определить энергию частицы, а по числу капелек на единицу длины трека оценивается ее скорость.

Помещая камеру в однородное магнитное поле (метод, предложенный советскими физиками П. Л. Капицей и Д. В. Скобельцыным), можно по направлению изгиба траектории и ее кривизне определить знак заряда и отношение заряда к массе или импульс частицы (если ее заряд известен).

Пузырьковая камера. В 1952 г. было предложено использовать для обнаружения треков частиц перегретую жидкость. В такой жидкости на ионах, образующихся при движении быстрой заряженной частицы, возникают пузырьки, дающие видимый трек. Камеры такого типа были названы *пузырьковыми*.

В исходном состоянии жидкость в камере находится под высоким давлением, предохраняющим ее от закипания, несмотря на то что температура жидкости выше температуры кипения при атмосферном давлении. При резком понижении давления жидкость оказывается перегретой и в течение небольшого времени она будет находиться в неустойчивом состоянии. Заряженные частицы, пролетающие именно в это время, вызывают появление треков, состоящих из пузырьков пара (рис. 261). В качестве жидкостей используются главным образом жидкий водород и пропан. Длительность рабочего цикла пузырьковой камеры невелика — около 0,1 с.

Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона обусловлено большей плотностью рабочего вещества. Пробеги частиц вс. едствие этого оказываются достаточно короткими, и частицы даже больших энергий застревают в камере. Это позволяет наблюдать серию последовательных превращений частицы и вызываемые ею реакции.

Треки в камере Вильсона и пузырьковой камере — один из главных источников информации о поведении и свойствах частиц.

Наблюдение следов элементарных частиц производит сильное впечатление, создает ощущение соприкосновения с микромиром.

Метод толстослойных фотоэмульсий. Для регистрации частиц наряду с камерами Вильсона и пузырьковыми камерами применяются толстослойные фотоэмульсии. Ионизирующее действие быстрых заряженных частиц на эмульсию фотопластинки позволило французскому физику А. Беккерелю открыть в 1896 г. радиоактивность. Метод фотоэмульсии был развит советскими физиками Л. В. Мысовским, А. П. Ждановым и др.

Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристалликов бромистого серебра. Быстрая заряженная частица, пронизывая кристаллик, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро и цепочка зерен серебра образует трек частицы (рис. 262). По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы.

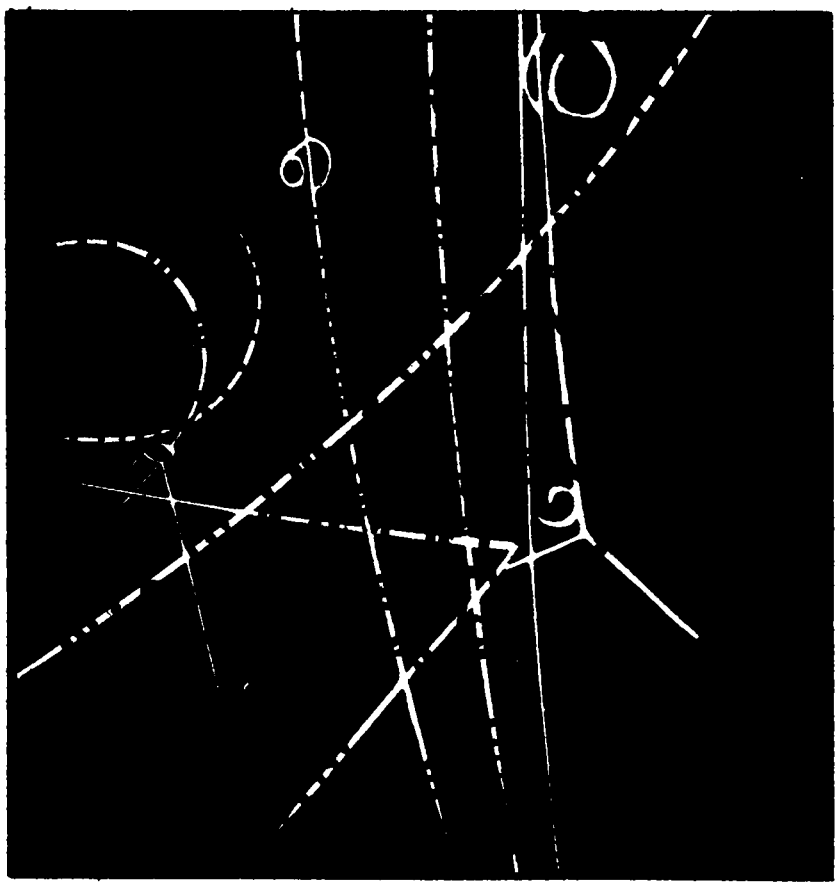


Рис. 261

Из-за большой плотности фотоэмульсии треки получаются очень короткими (порядка 10^{-3} см для α-частиц, испускаемых радиоактивными элементами), но при фотографировании их можно увеличить.

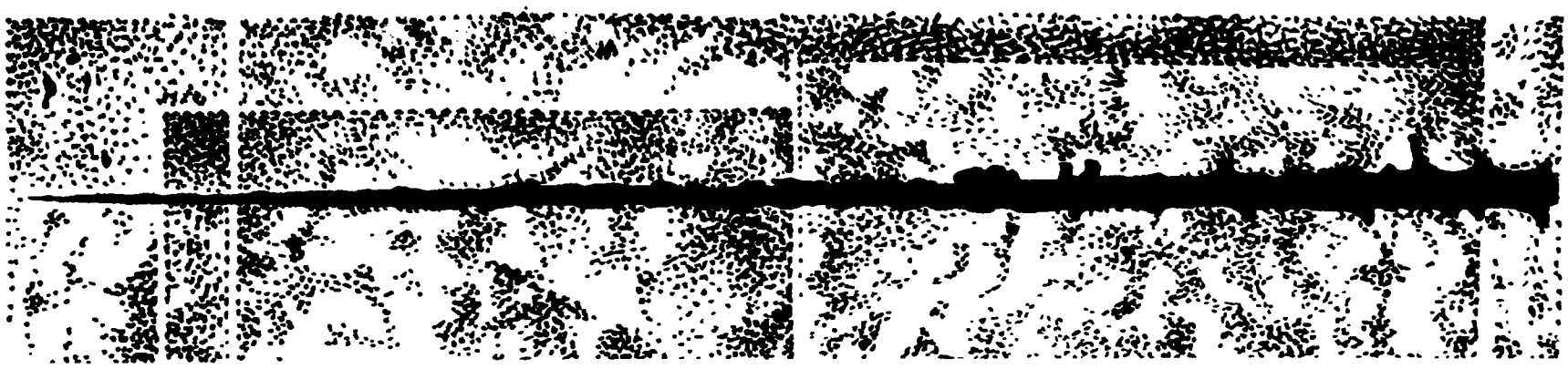


Рис. 262

Преимущество фотоэмульсий состоит в непрерывном суммирующем действии. Это позволяет регистрировать редкие явления. Важно и то, что благодаря высокой тормозящей способности фотоэмульсий увеличивается число наблюдаемых интересных реакций между частицами и ядрами.

§ 128. ОТКРЫТИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ

Открытие *естественной радиоактивности* — явления, доказывающего сложный состав атомного ядра, произошло благодаря счастливой случайности. Рентгеновские лучи, как вы помните, впервые были получены при столкновениях быстрых электронов со стеклянной стенкой разрядной трубки. Одновременно наблюдалось свечение стенок трубки. Беккерель долгое время занимался исследованием родственного явления — послесвечения веществ, предварительно подвергшихся облучению солнечным светом. К таким веществам принадлежат, в частности, соли урана, с которыми экспериментировал Беккерель.

И вот у него возник вопрос: не появляются ли после облучения солей урана наряду с видимым светом и рентгеновские лучи? Беккерель завернул фотопластинку в плотную черную бумагу, положил сверху крупинки урановой соли и выставил на яркий солнечный свет. После проявления пластинка почернела на тех участках, где лежала соль. Следовательно, уран создавал какое-то излучение, которое, подобно рентгеновскому, пронизывает непрозрачные тела и действует на фотопластинку. Беккерель думал, что это излучение возникает под влиянием солнечных лучей. Но однажды, в феврале 1896 г., провести очередной опыт ему не удалось из-за облачной погоды. Беккерель убрал пластинку в ящик стола, положив на нее сверху медный крест, покрытый солью урана. Проявив на всякий случай пластинку два дня спустя, он обнаружил на ней почернение в форме отчетливой тени креста. Это означало, что **соли урана самопроизвольно, без влияния внешних факторов создают какое-то излучение.** Начались интенсивные исследования. Конечно, не будь этой счастливой случайности, радиоактивные явления все равно были бы открыты, но, по-видимому, значительно позже.

Вскоре Беккерель обнаружил, что излучение урановых солей ионизирует воздух, подобно рентгеновским лучам, и разряжает

электроскоп. Испробовав различные химические соединения урана, он установил очень важный факт: интенсивность излучения определяется только количеством урана в препарате и совершенно не зависит от того, в какие соединения он входит. Следовательно, это свойство присуще не соединениям, а химическому элементу урану, его а т о м а м.

Естественно было попытаться обнаружить, не обладают ли способностью к самопроизвольному излучению другие химические элементы, кроме урана. В 1898 г. Мария Склодовская-Кюри во Франции и другие ученые обнаружили излучение тория. В дальнейшем главные усилия в поисках новых элементов были предприняты Марией Склодовской-Кюри и ее мужем Пьером Кюри. Систематическое исследование руд, содержащих уран и торий, позволило им выделить новый, неизвестный ранее химический элемент полоний, названный так в честь родины Марии Склодовской-Кюри — Польши.

Наконец, был открыт еще один элемент, дающий очень интенсивное излучение. Он был назван радием (т. е. лучистым). Само же явление самопроизвольного излучения было названо супругами Кюри *радиоактивностью*.

Радий имеет относительную атомную массу, равную 226, и занимает в таблице Менделеева клетку под номером 88. До открытия Кюри эта клетка пустовала. По своим химическим свойствам радий принадлежит к щелочноземельным элементам.

Впоследствии было установлено, что все химические элементы с порядковым номером более 83 являются радиоактивными.

§ 129. АЛЬФА-, БЕТА- И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

После открытия радиоактивных элементов началось исследование физической природы их излучения. Кроме Беккереля и супругов Кюри, этим занялся Резерфорд.

Классический опыт, позволивший обнаружить сложный состав радиоактивного излучения, состоял в следующем. Радиоактивный препарат помещался на дно узкого канала в куске свинца. Против канала помещалась фотопластинка. На выходившее из канала излучение действовало сильное магнитное поле (рис. 263), перпендикулярное к лучу. Вся установка размещалась в вакууме.

В отсутствие магнитного поля на фотопластинке после проявления обнаруживалось одно темное пятно, точно против канала. В магнитном поле пучок распадался на три пучка. Две составляющие первичного потока отклонялись в противоположные стороны. Это определенно указывало на наличие у этих электрических зарядов противоположных знаков. При этом отрицательная компонента излучения отклонялась магнитным полем гораздо больше, чем положительная. Третья составляющая не отклонялась магнитным полем. Положительно заряженная компонента получила

название альфа-лучей, отрицательно заряженная — бета-лучей и нейтральная — гамма-лучей (α-лучи, β-лучи, γ-лучи).

Эти три вида излучения очень сильно отличаются друг от друга по проникающей способности, т. е. по тому, насколько интенсивно они поглощаются различными веществами. Наименьшей проникающей способностью обладают α-лучи. Слой бумаги толщиной около 0,1 мм для них уже непрозрачен. Если прикрыть отверстие в свинцовой пластинке листочком бумаги, то на фотопластинке не обнаружится пятна, соответствующего α-излучению.

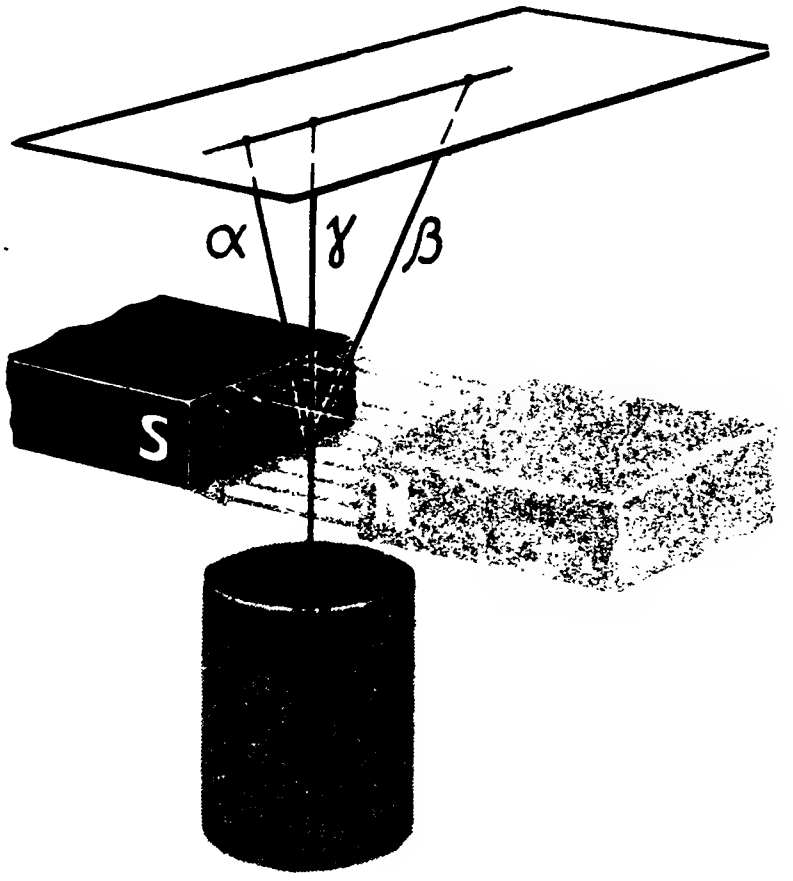


Рис. 263

Гораздо меньше поглощаются при прохождении через вещество β-лучи. Алюминиевая пластинка полностью их задерживает только при толщине несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают γ-лучи.

Как и в случае рентгеновских лучей, интенсивность поглощения γ-лучей увеличивается с ростом атомного номера вещества поглотителя. Но и слой свинца толщиной в сантиметр не является для них непреодолимой преградой. При прохождении через такую пластину их интенсивность убывает лишь вдвое.

Физическая природа α-, β- и γ-лучей, очевидно, различна.

Гамма-лучи. По своим свойствам γ-лучи очень сильно напоминают рентгеновские, но только их проникающая способность гораздо больше, чем у рентгеновских лучей. Это наводит на мысль, что γ-лучи представляют собой электромагнитные волны. Все сомнения в этом отпали после того, как была обнаружена дифракция γ-лучей на кристаллах и измерена длина волны. Она оказалась очень малой — от 10^{-8} до 10^{-11} см.

На шкале электромагнитных волн γ-лучи непосредственно следуют за рентгеновскими. Скорость распространения у γ-лучей такая же, как у всех электромагнитных волн,— около 300 000 км/с в вакууме.

Бета-лучи. С самого начала α- и β-лучи рассматривались как потоки заряженных частиц. Проще всего было экспериментировать с β-лучами, так как они сильно отклоняются как в магнитном, так и в электрическом поле.

Основная задача состояла в определении заряда и массы частиц. При исследовании отклонения β-частиц в электрических и магнитных полях было установлено, что они представляют собой не что иное, как электроны, движущиеся со скоростями, очень близ-

Мария Склодовская-Кюри (1867—1934) — выдающийся физик и химик; внесла ценнейший вклад в создание учения о радиоактивности. Родилась в Польше в семье учителя, работала во Франции. Она — первая женщиина-профессор Парижского университета. Мария Склодовская-Кюри совместно с мужем П. Кюри открыла новые радиоактивные элементы **полоний** и **радий** и исследовала их свойства. Она разработала классический метод обработки и анализа ураиовых руд, на протяжении ряда лет исследовала свойства радиоактивных излучений, действий их на живые клетки, радиоактивные изотопы и т. д. Мария Склодовская-Кюри дважды получала Нобелевскую премию: по физике и химии.

ками к скорости света. Существенно, что скорости β-частиц, испущенных данным радиоактивным элементом, неодинаковы. Встречаются частицы с самыми различными скоростями.

Альфа-частицы. Труднее оказалось выяснить природу α-частиц, так как они слабо отклоняются магнитным и электрическим полями.

Окончательно эту задачу удалось решить Резерфорду. Он измерил отношение заряда q частицы к ее массе m по отклонению в электрическом и магнитном полях. Оно оказалось примерно в два раза меньше, чем у протона — ядра атома водорода. Для определения массы α-частицы нужно было измерить еще ее заряд.

Это было сделано лишь после изобретения счетчика Гейгера. С его помощью подсчитывалось число частиц, попадающих в единицу времени внутрь металлического цилиндра, соединенного с электрометром (рис. 264). Сквозь очень тонкое окошко α-частицы могут проникать внутрь счетчика и регистрироваться им. Электрометр позволяет определить суммарный заряд α-частиц, испущенных за определенный интервал времени. Такого рода опыты показали, что заряд α-частицы равен удвоенному элементарному заряду. Следовательно, ее масса в четыре раза превосходит массу атома водорода, т. е равна массе атома гелия. Таким образом, α-частица оказалась ядром атома гелия [1].

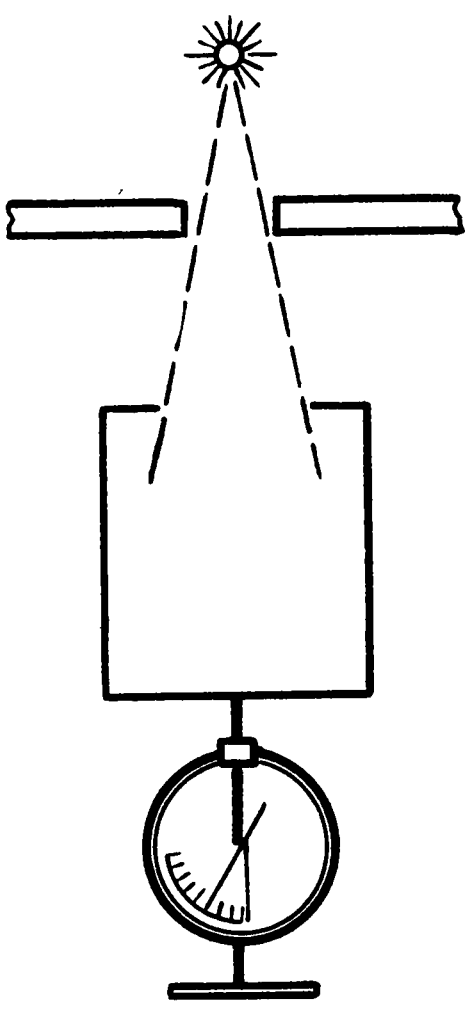


Рис. 264

Не довольствуясь достигнутым результатом, Резерфорд затем еще прямыми

[1] В то время (первое десятилетие XX в.) атомное ядро еще не было открыто. Поэтому Резерфорд говорил об ионе атома гелия.

опытами доказал, что при радиоактивном α-распаде образуется гелий. Собирая α-частицы внутри специального резервуара на протяжении нескольких дней, Резерфорд с помощью спектрального анализа убедился в том, что в сосуде накапливается гелий (каждая α-частица захватывала два электрона и превращалась в атом гелия).

§ 130. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Что же происходит с веществом при радиоактивном распаде?

Ответить на этот вопрос в начале XX века было очень не просто. Уже в самом начале исследований радиоактивности обнаружилось много странного и необычного.

В о-п е р в ы х, удивительное постоянство, с которым радиоактивные элементы уран, торий и радий испускают излучения. На протяжении суток, месяцев и лет интенсивность излучения заметно не изменялась. На него не оказывали никакого влияния такие обычные воздействия, как нагревание или увеличение давления.

Химические реакции, в которые вступали радиоактивные вещества, также не влияли на радиоактивный распад.

В о-в т о р ы х, очень скоро после открытия радиоактивности выяснилось, что при радиоактивном распаде выделяется много энергии. Поместив ампулу с хлористым радием в калориметр, в котором происходило поглощение α-, β- и γ-лучей с последующим превращением их энергии в тепло, Пьер Кюри нашел, что 1 г радия за 1 ч выделяет ≈582 Дж (136 кал). И эта энергия выделяется непрерывно на протяжении ряда лет.

Откуда же берется энергия, на выделение которой не оказывают никакого влияния все известные воздействия? По-видимому, при радиоактивном распаде вещество испытывает какие-то глубокие изменения, совершенно отличные от обычных химических превращений.

Превращения претерпевают сами атомы!

Сейчас эта мысль не может вызвать особого удивления, так как о ней ребенок может услышать еще раньше, чем научиться читать. Но в начале XX века она казалась фантастической и нужна была большая смелость, чтобы решиться высказать ее. В то время только что были получены бесспорные доказательства существования атомов. Идея Демокрита многовековой давности об атомистическом строении вещества наконец восторжествовала.

И вот почти сразу же вслед за этим неизменность атомов ставится под сомнение. Не будем рассказывать подробно о тех экспериментах, которые привели в конце концов к полной уверенности в том, что при радиоактивном распаде происходит цепочка последовательных превращений атомов. Остановимся только на самых первых опытах, начатых Резерфордом и продолженных им совместно с английским химиком Ф. С о д д и.

Резерфорд обнаружил, что радиоактивность тория остается неизменной в закрытой ампуле. Если же препарат обдувается даже очень слабыми потоками воздуха, то радиоактивность тория сильно уменьшается. Резерфорд предположил, что одновременно с α-частицами торий испускает какой-то газ, который также является радиоактивным.

Этот газ он назвал *эманацией*. Отсасывая воздух из ампулы, содержащей торий, Резерфорд выделил радиоактивный газ и исследовал его ионизирующую способность. Оказалось, что она очень быстро убывает со временем: каждую минуту активность (число распадов в единицу времени) убывает вдвое, и через десять минут она практически исчезает целиком. Содди исследовал химические свойства этого газа и нашел, что он не вступает ни в какие реакции, т. е. является инертным газом. Впоследствии газ был назван радоном и помещен в таблицу Менделеева под порядковым номером 86.

Цепочки превращений испытывали и другие радиоактивные элементы: уран, актиний, радий. Общий вывод, к которому пришли ученые, был точно сформулирован Резерфордом: «Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным [1] видоизменениям. В каждый момент небольшая часть общего числа атомов становится неустойчивой и взрывообразно распадается. В подавляющем большинстве случаев выбрасывается с огромной скоростью осколок атома — α-частица. В некоторых других случаях взрыв сопровождается выбрасыванием быстрого электрона и появлением лучей, обладающих, подобно рентгеновским лучам, большой проникающей способностью и называемых γ-излучением.

Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличное по своим физическим и химическим свойствам от первоначального вещества. Это новое вещество, однако, само также неустойчиво и испытывает превращение с испусканием характерного радиоактивного излучения.

Таким образом, точно установлено, что атомы некоторых элементов подвержены спонтанному распаду, сопровождающемуся излучением энергии в количествах, огромных по сравнению с энергией, освобождающейся при обычных молекулярных видоизменениях».

После того как было открыто атомное ядро, сразу же стало ясно, что именно оно претерпевает изменения при радиоактивных превращениях. Ведь α-частиц вообще нет в электронной оболочке, а уменьшение числа электронов оболочки на единицу превращает атом в ион, а не в новый химический элемент. Выброс же электрона из ядра меняет заряд ядра (увеличивает его) на единицу. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева и все его химические свойства.

---

[1] *Спонтанный* означает самопроизвольный.

§ 131. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА

Ранее уже упоминалось, что при исследовании радиоактивного распада Резерфорд установил опытным путем характер зависимости активности радиоактивных веществ от времени — основной *закон радиоактивного распада.* Оказалось, что **для каждого радиоактивного вещества существует определенный интервал времени, на протяжении которого активность убывает в два раза.** Этот интервал носит название периода полураспада. Период полураспада T — это то время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов. Ведь уменьшения активности препарата в два раза можно достичь простым делением его на две равные части.

Спад активности, т. е. числа распадов в секунду, в зависимости от времени для одного из радиоактивных веществ изображен на рисунке 265. Период полураспада этого вещества равен 5 сут.

Найдем теперь математическую форму закона радиоактивного распада. Пусть число радиоактивных атомов в начальный момент времени ($t=0$) равно N_0. Тогда по истечении периода полураспада это число будет равно $N_0/2$. Спустя еще один такой же интервал времени это число станет равным

$$\frac{1}{2}\,\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{2^2}.$$

По истечении времени $t=nT$, т. е. спустя n периодов полураспада T, радиоактивных атомов останется

$$N=N_0\,\frac{1}{2^n},$$

или

$$N=N_0 2^{-\frac{t}{T}} \qquad (12.1)$$

Это и есть основной закон радиоактивного распада.

Период полураспада — основная величина, характеризующая скорость радиоактивного распада. Для разных веществ он имеет сильно различающиеся значения. Так, для урана $T\approx 4{,}5$ млрд. лет. Именно поэтому активность урана на протяжении отрезка времени в несколько лет заметно не меняется. Для радия $T=1600$ лет. Поэтому активность радия значительно больше, чем урана. Чем меньше период полураспада, тем интенсивнее протекает распад. Есть радиоактивные элементы с периодом полураспада в миллионные доли секунды.

Период полураспада можно определить по формуле (12.1), подсчитав число атомов, распавшихся за некоторый промежуток времени, и зная число атомов в начальный момент.

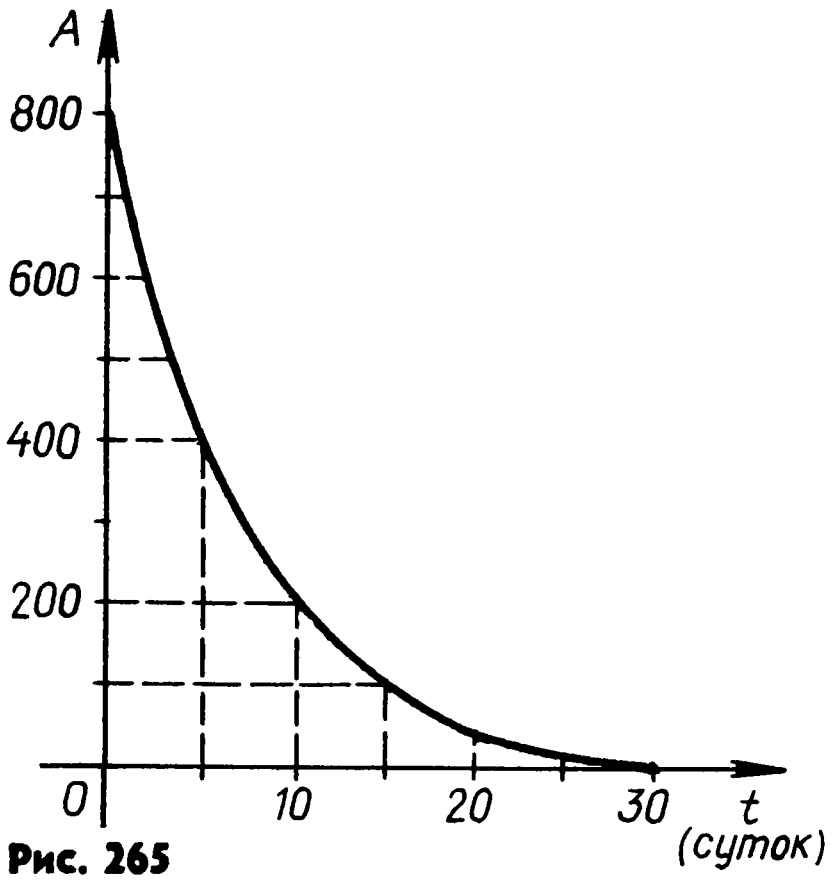


Рис. 265

Сам закон радиоактивного распада довольно прост. Но физический смысл этого закона представить себе нелегко. Действительно, согласно этому закону за любой интервал времени распадается одна и та же доля имеющихся атомов (за период полураспада — половина атомов). Значит, с течением времени скорость распада нисколько не меняется. **Радиоактивные атомы не «стареют».** Так, атомы радона, возникающие при распаде радия, имеют одинаковые шансы претерпеть радиоактивный распад как сразу же после своего образования, так и спустя полчаса после этого. Распад любого атомного ядра — это, так сказать, не «смерть от старости», а «несчастный случай» в его жизни. Для радиоактивных атомов (точнее, ядер) не существует понятия возраста. Можно определить лишь *среднее время жизни* τ.

Время существования отдельных атомов может колебаться от долей секунды до миллиардов лет. Атом урана, например, может спокойно пролежать в земле миллиарды лет и внезапно взорваться, в то время как его соседи благополучно продолжают оставаться в прежнем состоянии. Среднее время жизни — это просто среднее арифметическое времени жизни достаточно большого количества атомов данного сорта. Оно прямо пропорционально периоду полураспада. Можно показать, что

$$\tau \approx 1{,}4\,T. \qquad (12.2)$$

Предсказать, когда произойдет распад данного атома, невозможно. Определенный смысл имеют только утверждения о поведении в среднем большой совокупности атомов. Именно в среднем число атомов, распадающихся за данный интервал времени, определяется законом радиоактивного распада. Но всегда имеются неизбежные отклонения от среднего значения, и, чем меньше количество атомов в препарате, тем больше эти отклонения. Закон радиоактивного распада является *статистическим законом.* Он справедлив в среднем для большого количества частиц.

§ 132. ИЗОТОПЫ

Изучение явления радиоактивности привело к важному открытию, касающемуся природы атомных ядер.

В результате наблюдения огромного числа радиоактивных превращений постепенно выяснилось, что существуют вещества,

имеющие совершенно различные радиоактивные свойства (т. е. распадающиеся разными способами), но совершенно тождественные по своим химическим свойствам. Их никак не удавалось разделить всеми известными химическими способами. На этом основании Содди в 1911 г. высказал предположение о возможности существования элементов с одинаковыми химическими свойствами, но различающихся в других отношениях, в частности своей радиоактивностью. Эти элементы нужно помещать в одну и ту же клетку периодической системы Менделеева. Содди назвал их *изотопами* (т. е. занимающими одинаковые места).

Предположение Содди получило блестящее подтверждение и глубокое толкование год спустя, когда Томсон предпринял точные измерения массы ионов неона методом отклонения их в электрических и магнитных полях. Томсон обнаружил, что неон представляет собой смесь двух сортов атомов. Бóльшая часть их имеет относительную массу, равную 20. Но имеется незначительная добавка атомов с относительной атомной массой 22. В результате относительная атомная масса смеси равна 20,2. Атомы, обладающие одними и теми же химическими свойствами, различались массой. Оба сорта неона, естественно, занимают одно и то же место в таблице Менделеева и, следовательно, являются изотопами. Таким образом, изотопы могут отличаться не только своими радиоактивными свойствами, но и массой. Причем именно последнее обстоятельство и оказалось главным. У изотопов заряды атомных ядер, которые определяют число электронов в оболочке и, следовательно, химические свойства атомов, одинаковы. Но массы ядер различны. Причем ядра могут быть как радиоактивными, так и стабильными. Различие свойств радиоактивных изотопов связано с тем, что их ядра имеют различную массу.

В настоящее время установлено существование изотопов у всех химических элементов, но только не все элементы имеют стабильные изотопы. Изотопы есть у самого тяжелого из существующих в природе элементов — урана (относительные атомные массы 238, 235 и др.) и у самого легкого — водорода (относительные атомные массы 1, 2, 3).

Особенно замечательны изотопы водорода, так как они отличаются друг от друга по массе в два или три раза. Изотоп с относительной атомной массой 2 называется *дейтерием*. Он стабилен и входит в качестве небольшой примеси (1 : 4500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая тяжелая вода. Ее физические свойства заметно отличаются от обычной. При нормальном атмосферном давлении она кипит при 101,2 °С и замерзает при 3,8 °С.

Изотоп водорода с атомной массой 3 называется *тритием*. Он β-радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет.

Существование изотопов доказывает, что заряд атомного ядра и, следовательно, строение электронной оболочки определяют не все свойства атомов, а лишь его химические свойства и те физи-

ческие свойства, которые зависят от периферии электронной оболочки, например размеры. Масса же атома и его радиоактивные свойства не определяются порядковым номером в таблице Менделеева.

Существенно, что при точном измерении относительных атомных масс изотопов выяснилось, что они близки к целым числам. Сильное отклонение относительных атомных масс некоторых химических элементов от целых чисел (атомная масса хлора, например, равна 35,5) объясняется тем, что в естественном состоянии химически чистое вещество представляет собой смесь изотопов в различных пропорциях. Целочисленность (приближенная) относительных атомных масс изотопов очень важна для выяснения строения атомного ядра.

§ 133. ПРАВИЛО СМЕЩЕНИЯ

Лишь после того как были открыты изотопы, удалось разобраться в последовательной цепи радиоактивных превращений элементов. Эти превращения подчиняются так называемому *правилу смещения*, сформулированному впервые Содди: **при α-распаде ядро теряет положительный заряд 2 e и масса его убывает приблизительно на четыре единицы относительной атомной массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.** Символически это можно записать так:

$$^{M}_{Z}X \rightarrow {}^{M-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Здесь элемент обозначается, как и в химии, общепринятыми символами; заряд ядра записывается в виде индекса, стоящего внизу символа слева, а атомная масса — в виде индекса вверху символа слева. Например, обычный изотоп водорода обозначается символом ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, дейтерий — символом ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$. Для α-частицы, являющейся ядром атома гелия, применяется обозначение ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ и т. д.

При β-распаде из ядра вылетает электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остается почти неизменной:

$$^{M}_{Z}X \rightarrow {}^{M}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e.$$

Здесь ${}^{0}_{-1}e$ обозначает электрон: индекс «0» вверху означает, что масса его очень мала по сравнению с единицей относительной атомной массы. **После β-распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.** Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда; масса же ядра меняется ничтожно мало.

Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется электрический заряд и приближенно сохраняется относительная атомная масса ядер.

Возникшие при радиоактивном распаде новые ядра в свою очередь обычно также радиоактивны.

§ 134. ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

Впервые в истории человечества искусственное превращение ядер было осуществлено Резерфордом в 1919 г. Это не было уже случайным открытием.

Так как ядро весьма устойчиво и ни высокие температуры, ни давления, ни электромагнитные поля не вызывают превращения элементов и не влияют на скорость радиоактивного распада, то Резерфорд предположил, что для разрушения или преобразования ядра нужна очень большая энергия. Наиболее концентрированным источником энергии в то время была энергия α-частиц, вылетающих из ядер при радиоактивном распаде.

Первым ядром, подвергшимся искусственному преобразованию, было ядро азота $^{14}_{7}N$. Бомбардируя азот α-частицами большой энергии, испускаемыми радием, Резерфорд обнаружил появление протонов — ядер атома водорода.

В первых опытах регистрация протонов проводилась методом сцинтилляций, и результаты опыта не были достаточно убедительными и надежными. Но спустя несколько лет превращение азота удалось наблюдать в камере Вильсона. Примерно одна α-частица на 50 000, испущенных радиоактивным препаратом в камере, захватывается ядром азота, что приводит к испусканию протона. При этом ядро азота превращается в ядро изотопа кислорода:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H.$$

На рисунке 266 показана одна из фотографий этого процесса. Слева видна характерная «вилка»—разветвление трека. Жирный след принадлежит ядру кислорода, а тонкий — протону. Остальные α-частицы не претерпевают столкновений с ядрами, и их треки прямолинейны.

Другими исследователями были обнаружены превращения под влиянием α-частиц ядер фтора, натрия, алюминия и др. Ядра тяжелых элементов конца периодической системы не испытывали превращений. Очевидно, их большой электрический заряд не позволял α-частице приблизиться к ядру вплотную.

Существенно, что кинетическая энергия α-частицы не равняется сумме кинетических энергий протона и нового ядра, возникшего в результате превращения. Реакция идет с поглощением кинетической энергии. Часть кинетической энергии (примерно $1{,}2 \cdot 10^6$ эВ) переходит во внутреннюю энергию вновь образовавшегося ядра.

Но аналогичная реакция расщепления алюминия приводит к выделению кинетической энергии: кинетическая энергия продуктов реакции больше кинетической энергии α-частицы, бомбардировавшей ядро алюминия, на 400 000 эВ. Это громадная энергия,

Рис. 266

но использовать ее здесь практически нельзя. Ведь бóльшая часть α-частиц не вызывает реакции, и их кинетическая энергия теряется без пользы. Однако уже эти наблюдения показали, что запасы энергии внутри атомных ядер исключительно велики, и нужно только суметь эту энергию извлечь.

§ 135. ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА

В 1932 г. произошло важнейшее для всей ядерной физики событие — был открыт *нейтрон.*

При бомбардировке бериллия α-частицами протоны не появлялись. Но обнаружилось какое-то сильно проникающее излучение, способное преодолеть такую преграду, как свинцовая пластина в 10—20 см толщиной. Было сделано предположение, что это γ-лучи большой энергии. Ирен Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри) и ее муж Фредерик Жолио-Кюри (впоследствии всемирно известный физик) обнаружили, что если на пути излучения бериллия поставить парафиновую пластину, то ионизирующая способность этого излучения резко увеличивается. Они справедливо предположили, что излучение бериллия выбивает из парафиновой пластины протоны, имеющиеся в большом количестве в этом водородосодержащем веществе. С помощью камеры Вильсона (схема опыта приведена на рисунке 267) супруги Жолио-Кюри обнаружили эти протоны и по длине пробега оценили их энергию. Если допустить, что протоны ускорялись в результате столкновения с γ-квантами, то энергия этих квантов должна быть огромной — около 55 МэВ

В 1932 г. ученик Резерфорда — английский физик Д. Чедвик наблюдал в камере Вильсона треки ядер азота, испытавших столкновение с бериллиевым излучением. По его оценке, энергия γ-квантов, способных сообщать ядрам скорость, соответствующую наблюдениям, должна была составлять 90 МэВ. Наблюдения же ядер отдачи аргона привели к еще более огромной цифре — 150 МэВ. Считая, что ядра приходят в движение в результате столкновения с частицами, лишенными массы покоя, исследователи пришли к явному противоречию.

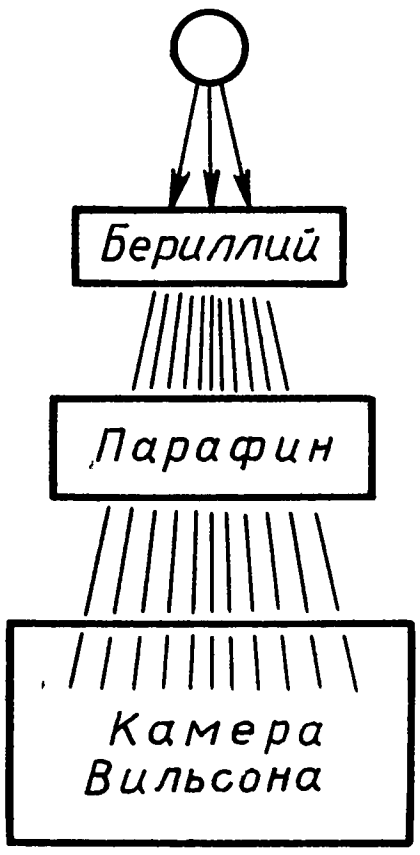


Рис. 267

Стало очевидным, что предположение об излучении бериллием γ-квантов, т. е. частиц, лишенных массы покоя, несостоятельно. Из бериллия под действием α-частиц вылетают какие-то достаточно тяжелые частицы, так как только при столкновениях с тяжелыми частицами протоны или ядра азота и аргона могли получить ту большую энергию, которая наблюдалась. Поскольку эти частицы обладали боль-

щой проникающей способностью и непосредственно не ионизировали газ, то, следовательно, они были электрически нейтральными. Ведь заряженная частица сильно взаимодействует с веществом и поэтому быстро теряет свою энергию.

Новая частица была названа *нейтроном*. Существование ее предсказывал Резерфорд более чем за 10 лет до опытов Чедвика. По энергии и импульсу ядер, сталкивающихся с нейтронами, была определена их масса. Она оказалась чуть больше массы протона — 1838,6 электронных масс вместо 1836,1 для протона.

При попадании α-частиц в ядра бериллия происходит следующая реакция:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n.$$

Здесь ${}^{1}_{0}n$ — символ нейтрона; заряд его равен нулю, а относительная масса — приблизительно единице.

Подобная реакция наблюдается также при бомбардировке α-частицами бора — пятого элемента периодической системы.

?

1. Можно ли с помощью камеры Вильсона регистрировать незаряженные частицы?

2. Какие преимущества имеет пузырьковая камера по сравнению с камерой Вильсона?

3. Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивных превращениях?

4. Счетчик регистрирует β-частицы радиоактивного препарата очень малой интенсивности. Происходит ли срабатывание счетчика через одинаковые интервалы времени?

5. Существуют ли изотопы у бария, относительная атомная масса которого равна 137,34?

6. Объясните, почему при центральном столкновении с протоном нейтрон передает ему всю энергию, а при столкновении с ядром азота только ее часть.

§ 136. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Сразу же после того как в опытах Чедвика был открыт нейтрон, советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий ученый В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра. Она была подтверждена последующими исследованиями ядерных превращений и в настоящее время является бесспорной.

Согласно протонно-нейтронной модели **ядра состоят из элементарных частиц двух сортов: протонов и нейтронов.**

Число протонов в ядре равняется числу электронов в атомной оболочке, так как в целом атом нейтрален. Следовательно, число протонов в ядре равно атомному номеру элемента Z в таблице Менделеева.

Массовым числом A называют сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре:

$$A = Z + N. \qquad (12.3)$$

Так как массы протона и нейтрона близки друг к другу, то массовое число равно округленной до целого числа относительной атомной массе элемента. Массовые числа могут быть определены путем грубого измерения масс ядер приборами, не обладающими особо большой точностью.

Изотопы представляют собой ядра с одним и тем же значением Z, но различными массовыми числами A, т. е. с различным числом нейтронов N.

Так как ядра весьма устойчивы, то протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядра какими-то силами, причем очень большими. Что это за силы? Заведомо можно сказать, что это не гравитационные силы, которые слишком слабы. Устойчивость ядра не может быть объяснена также электромагнитными силами по той причине, что между одноименно заряженными протонами действует электрическое отталкивание, а нейтроны лишены электрического заряда.

Значит, между ядерными частицами — протонами и нейтронами (часто их называют *нуклонами*) — действуют особые силы. Название для них нашлось само собой — *ядерные силы.* Каковы основные свойства ядерных сил?

Эти силы примерно в 100 раз превосходят электромагнитные. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Поэтому взаимодействия ядерных частиц часто называют *сильными взаимодействиями.*

Сильные взаимодействия не сводятся только к взаимодействию нуклонов в ядре. Это особый тип взаимодействия, присущий многим элементарным частицам наряду с электромагнитными взаимодействиями.

Другая важная особенность ядерных сил — это их короткодействующий характер. Электромагнитные силы сравнительно медленно убывают с расстоянием. Ядерные силы заметно проявляются, как показали уже опыты Резерфорда по рассеянию α-частиц ядрами, лишь на расстояниях, равных по порядку величины размерам ядра (10^{-12}—10^{-13} см). Это, так сказать, «богатырь с очень короткими руками». Количественная теория ядерных сил пока еще не построена.

§ 137. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

Важнейшую роль во всей ядерной физике играет понятие *энергии связи ядра.*

Под энергией связи ядра понимают ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные частицы. На основании закона сохранения энергии можно также утверждать, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц. Энергия связи атомных ядер очень велика. Но как ее найти?

В настоящее время, когда отсутствует количественная теория ядерных сил, рассчитать энергию связи теоретически, подобно тому как это можно сделать для электронов в атоме, нельзя. Тем не менее энергия связи любого ядра поддается определению путем точного измерения его массы. Выполнить соответствующие расчеты можно, лишь применяя соотношение Эйнштейна между массой и энергией:

$$E = mc^2. \qquad (12.4)$$

Точнейшие измерения масс ядер показывают, что **масса покоя ядра $M_я$ всегда меньше суммы масс покоя слагающих его протонов и нейтронов:**

$$M_я < Zm_p + Nm_n. \qquad (12.5)$$

Существует, как говорят, дефект масс: Разность масс

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_я$$

положительна. В частности, для гелия масса ядра на 0,7% меньше суммы масс двух протонов и двух нейтронов. Соответственно, для одного моля гелия $\Delta M = 0{,}024$ г.

Уменьшение массы при образовании ядра из частиц означает, что при этом уменьшается энергия этой системы частиц на величину энергии связи $\Delta E_{св}$:

$$\Delta E_{св} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_я)\, c^2. \qquad (12.6)$$

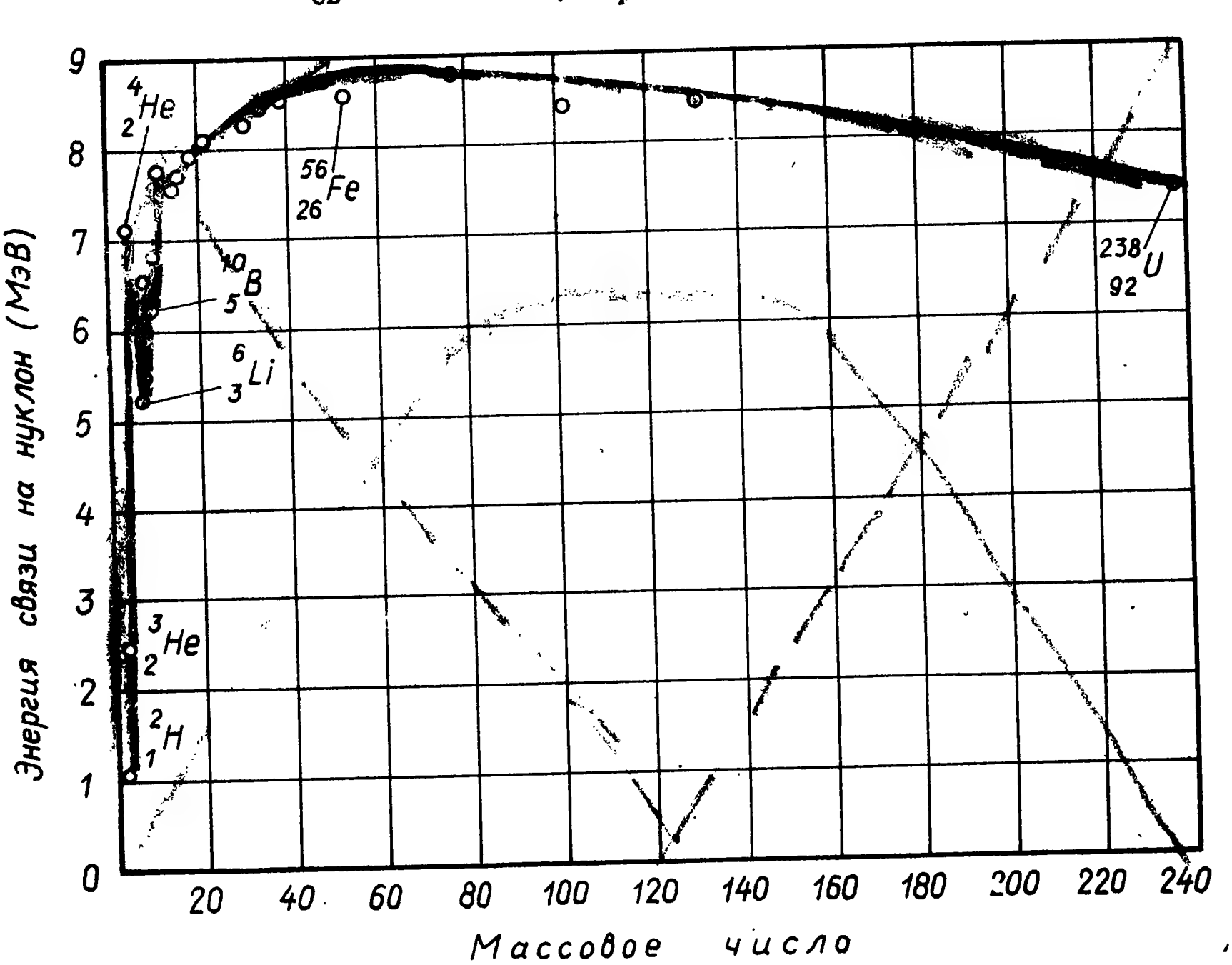


Рис. 268

Но куда при этом исчезают энергия $\Delta E_{св}$ и масса ΔM?

При образовании ядра из частиц последние за счет действия ядерных сил на малых расстояниях устремляются с огромным ускорением друг к другу. Излучаемые при этом γ-кванты обладают энергией $\Delta E_{св}$ и массой

$$\Delta M = \frac{\Delta E_{св}}{c^2}.$$

О величине энергии связи можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, как и при сгорании 5—6 вагонов каменного угля.

Важную информацию о свойствах ядер содержит экспериментально измеренная зависимость *удельной энергии связи,* т. е. энергии связи, приходящейся на одну ядерную частицу, от массового числа A. Из рисунка 268 хорошо видно, что, не считая самых легких ядер, удельная энергия связи примерно постоянна и равна $8\,\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. Отметим, что энергия связи электрона с ядром в атоме водорода, равная энергии ионизации, почти в миллион раз меньше.

Кривая зависимости удельной энергии связи от массового числа A имеет слабо выраженный максимум, равный $8{,}6\,\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, при $A \approx 50$—60, т. е. у железа и близких к нему по порядковому номеру элементов. Ядра этих элементов наиболее устойчивы.

Уменьшение удельной энергии связи для легких элементов объясняется поверхностными эффектами. Нуклоны, находящиеся на поверхности ядра, взаимодействуют с меньшим числом соседей, чем нуклоны внутри ядра, так как ядерные силы являются короткодействующими. Поэтому энергия связи нуклонов на поверхности меньше, чем у нуклонов внутри ядра. Чем меньше ядро, тем бо́льшая часть от общего числа нуклонов оказывается на поверхности. Из-за этого энергия связи в среднем на один нуклон меньше у легких ядер.

У тяжелых ядер удельная энергия связи уменьшается за счет растущей с увеличением Z кулоновской энергии отталкивания протонов. Кулоновские силы стремятся разорвать ядро.

§ 138. ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

После того как мы познакомились с основами строения атомного ядра, возвратимся опять к превращениям атомных ядер, вызываемым искусственно.

Можно предположить, что при искусственно вызываемых превращениях атомных ядер возникают радиоактивные ядра, которых нет в природе. Могут быть получены неустойчивые изотопы тех химических элементов, которые в естественных условиях стабильны. Такое явление действительно было открыто супругами Фредериком и Ирен Жолио-Кюри в 1934 г. и названо ими искусственной радиоактивностью.

Фредерик Жолио-Кюри (1900—1958) — выдающийся французский ученый и прогрессивный общественный деятель, один из основателей всемирного движения сторонников мира. Жолио-Кюри совместно с женой Ирен открыл в 1934 г. искусственную радиоактивность. Большое значение для открытия нейтрона имели работы супругов Кюри по исследованию излучения бериллия под действием α-частиц. Фредерик Жолио-Кюри с сотрудниками в 1939 г. впервые определил среднее число нейтронов, вылетающих при делении ядра атома урана.

Жолио-Кюри продолжали исследование превращений атомов под действием α-частиц. Бомбардируя алюминий и некоторые другие элементы, они обнаружили новый вид превращений. Под действием α-частиц излучались не электроны, как во многих других случаях, а позитроны. Позитрон — двойник электрона, отличающийся от него только знаком электрического заряда,— был открыт незадолго до этого. Заинтересовавшись явлением, ученые решили его тщательно исследовать. Они поместили алюминиевую фольгу на небольшом расстоянии от источника α-частиц и подвергли ее облучению в течение нескольких минут. Затем препарат удалили и с помощью счетчика Гейгера обнаружили, что фольга стала радиоактивной. Она испускала позитроны в течение некоторого времени. Это было совершенно новое, неизвестное дотоле явление. Ядра испытывали превращения после того, как воздействие α-частиц прекратилось. Явление было истолковано следующим образом.

Ядра алюминия захватывают α-частицы, испуская одновременно нейтроны. При этом образуется изотоп фосфора $^{30}_{15}\mathrm{P}$:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}n.$$

Полученный искусственным способом изотоп $^{30}_{15}\mathrm{P}$ радиоактивен[1] и распадается с испусканием позитронов:

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{0}_{+1}e.$$

Это один из примеров образования искусственно радиоактивных ядер. Впоследствии было получено около тысячи радиоактивных изотопов, в то время как число естественных радиоактивных изотопов не превышает 40. Для каждого элемента в настоящее время известно несколько радиоактивных изотопов, получаемых искусственно. С помощью искусственной радиоактивности изготовляют трансурановые элементы — элементы с порядковым номером, большим 92.

[1] Естественный изотоп фосфора $^{31}_{15}\mathrm{P}$ стабилен.

§ 139. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Изменения ядер при взаимодействии их с элементарными частицами и друг с другом принято называть *ядерными реакциями.* Обычно ядерные реакции наблюдаются при бомбардировке тяжелых ядер элементарными частицами или легкими ядрами, ускоренными до больших энергий. Мы уже знакомы с некоторыми примерами ядерных реакций.

В настоящее время заряженные частицы больших энергий — протоны, дейтроны, α-частицы и более тяжелые ядра — получают с помощью ускорителей элементарных частиц и ионов. Для осуществления ядерных реакций они гораздо эффективнее, чем α-частицы, испускаемые естественными радиоактивными элементами. Во-первых, им может быть сообщена энергия, гораздо бóльшая (более сотен миллиардов электрон-вольт) той, которую имеют α-частицы (максимально 9 МэВ). Во-вторых, можно использовать протоны, которые в процессе радиоактивного распада не появляются (это целесообразно потому, что их заряд вдвое меньше заряда α-частиц, и поэтому действующая на них сила со стороны ядер тоже в два раза меньше). В-третьих, можно ускорить ядра, более тяжелые, чем ядра гелия.

Первое превращение атомных ядер с помощью протонов большой энергии, полученных на ускорителе, было осуществлено в 1932 г., когда удалось расщепить литий на две α-частицы:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}.$$

Как видно на фотографии треков в камере Вильсона (рис. 269), ядра гелия разлетаются в разные стороны вдоль одной прямой в соответствии с требованиями закона сохранения импульса (импульс протона много меньше импульса возникающих α-частиц). Эта реакция идет с выделением огромной энергии — около 17,3 МэВ. Мы не будем больше приводить примеров ядерных реакций, вызываемых заряженными частицами. Остановимся только на реакциях, в которых участвуют нейтроны.

Открытие нейтрона было поворотным пунктом в исследовании ядерных реакций. Так как нейтроны лишены заряда, то они беспрепятственно проникают в атомные ядра и вызывают их превращения. Великий итальянский физик Энрико Ферми, который первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами, обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами, движущимися с тепловыми скоростями. Причем эти медленные нейтроны оказываются в большинстве случаев даже гораздо более эффективными, чем быстрые. Поэтому быстрые нейтроны целесообразно предварительно замедлять. Замедление нейтронов до тепловых скоростей происходит в обыкновенной воде. Этот эффект объясняется тем, что в воде содержится большое число ядер водорода — протонов, масса которых почти равна массе нейтронов. При столкновениях

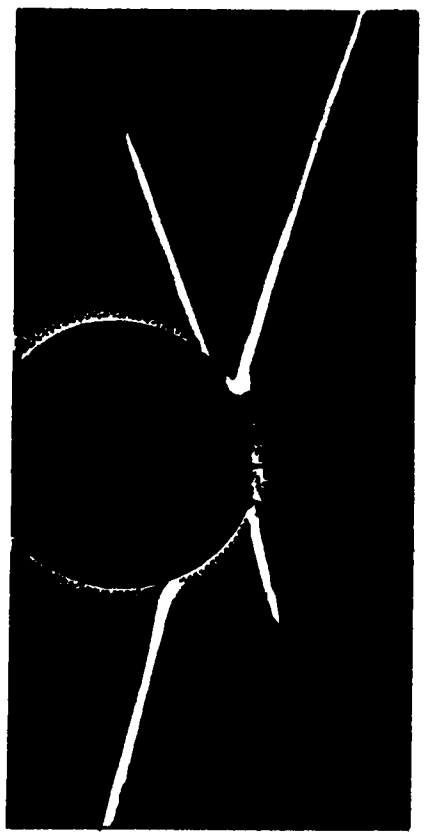


Рис. 269

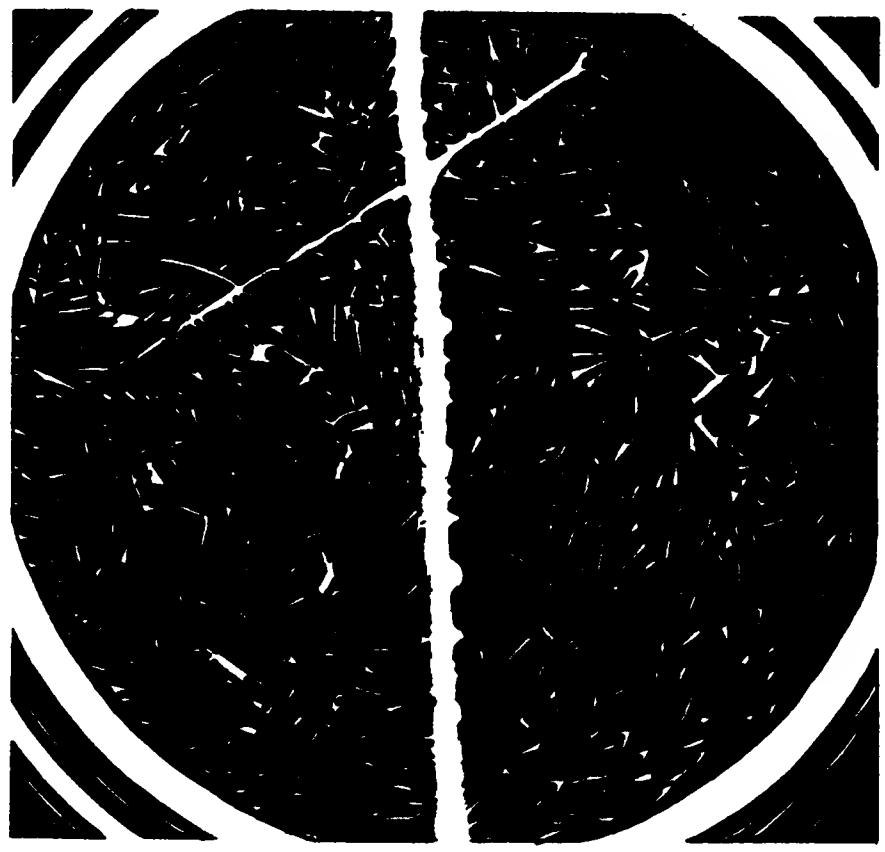


Рис. 270

же шаров одинаковой массы происходит наиболее интенсивная передача кинетической энергии. При центральном соударении нейтрона с покоящимся протоном он целиком передает протону свою кинетическую энергию.

§ 140. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА

Особым видом ядерных реакций является *деление атомных ядер,* при котором ядро тяжелого элемента делится на две части с одновременным испусканием двух-трех нейтронов, γ-лучей и значительным выделением энергии.

Открытие деления урана. Деление ядер урана было открыто в 1938 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом. Им удалось установить, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы: барий, криптон и др. Однако правильное истолкование этого факта, именно как деления ядра урана, захватившего нейтрон, было дано в начале 1939 г. О. Фришем и Л. Мейтнер.

Деление ядра возможно благодаря тому, что масса покоя тяжелого ядра больше суммы масс покоя осколков, возникающих при делении. Из-за этого происходит выделение энергии, эквивалентной уменьшению массы покоя, сопровождающему деление. Но полная масса сохраняется, так как масса, движущихся с большой скоростью осколков превышает их массу покоя.

Возможность деления тяжелых ядер можно также объяснить с помощью графика зависимости удельной энергии связи от массового числа A (см. рис. 268). Удельная энергия связи ядер атомов, занимающих в периодической системе последние места ($A \approx 200$), примерно на 1 МэВ меньше удельной энергии связи в ядрах элементов, находящихся в середине периодической системы ($A \approx 100$). Поэтому процесс деления тяжелых ядер на ядра

элементов средней части периодической системы является «энергетически выгодным». Система после деления переходит в состояние с минимальной внутренней энергией. Ведь чем больше энергия связи ядра, тем бóльшая энергия должна выделяться при образовании ядра и, следовательно, тем меньше внутренняя энергия образовавшейся вновь системы.

При делении ядра энергия связи, приходящаяся на каждый нуклон, увеличивается на 1 МэВ и общая выделяющаяся энергия должна быть огромной — порядка 200 МэВ. Ни при какой другой ядерной реакции (не связанной с делением) столь больших энергий не выделяется.

Непосредственные измерения энергии, выделяющейся при делении ядра урана $^{235}_{92}U$, подтвердили приведенные соображения и дали величину $\approx$200 МэВ. Причем бóльшая часть этой энергии (168 МэВ) приходится на кинетическую энергию осколков. На рисунке 270 вы видите треки осколков делящегося урана в камере Вильсона.

Выделяющаяся при делении ядер энергия имеет электростатическое, а не ядерное происхождение. Бóльшая кинетическая энергия, которую имеют осколки, возникает вследствие их кулоновского отталкивания.

Механизм деления ядра. Процесс деления атомного ядра можно объяснить на основе капельной модели ядра. Согласно этой модели сгусток нуклонов напоминает капельку заряженной жидкости (рис. 271, *а*). Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими, подобно силам между молекулами жидкости. Наряду с большими силами электростатического отталкивания между протонами, стремящимися разорвать ядро на части, действуют еще бóльшие ядерные силы притяжения. Эти силы удерживают ядро от распада.

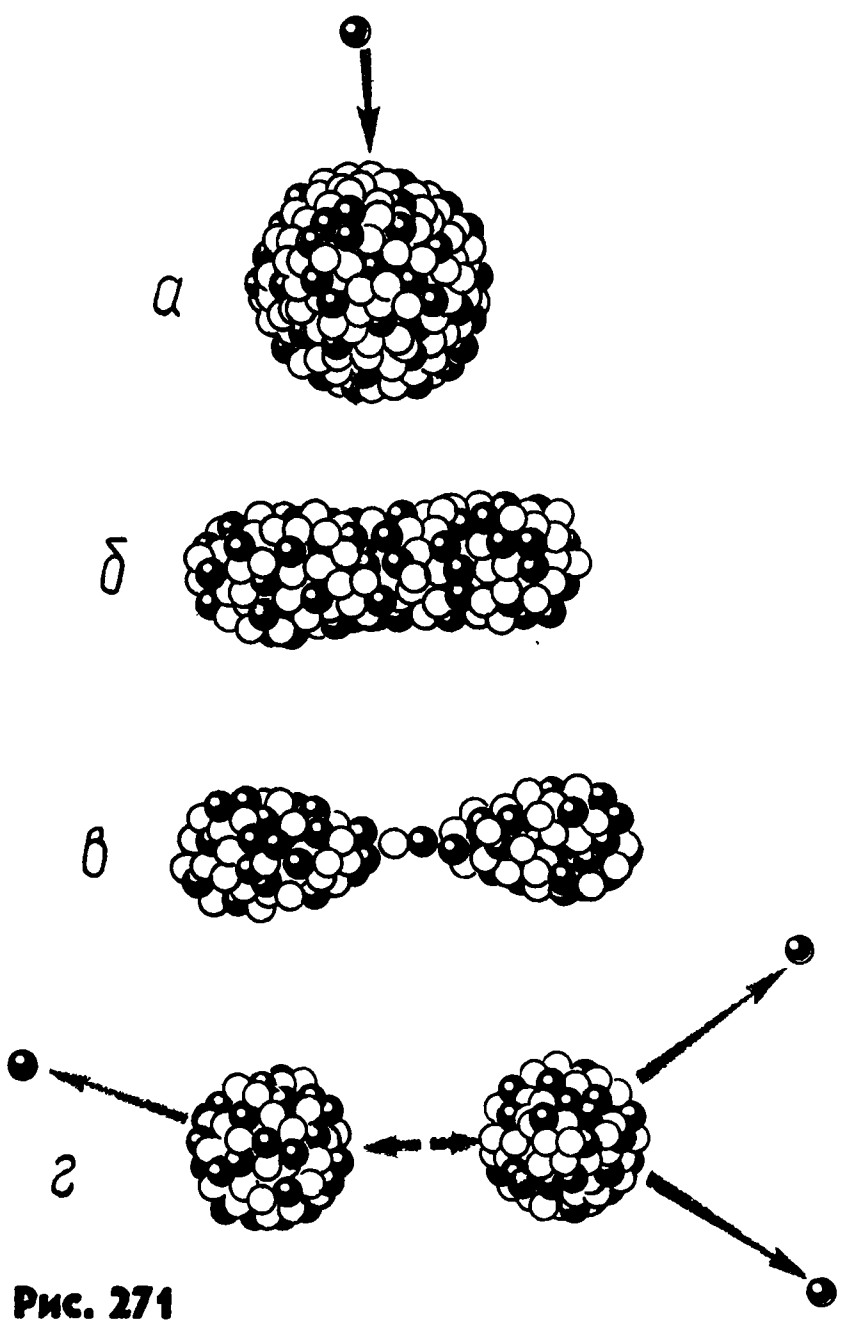


Рис. 271

Ядро урана-235 имеет форму шара. Поглотив лишний нейтрон, ядро возбуждается и начинает деформироваться, приобретая вытянутую форму (рис. 271, *б*). Ядро растягивается до тех пор, пока силы отталкивания между концами вытянутого ядра не начинают преобладать над силами сцепле-

ния, действующими в перешейке (рис. 271, *в*). Растягиваясь еще сильнее, ядро разрывается на две части (рис. 271, *г*). Под действием кулоновских сил отталкивания эти части, или осколки, разлетаются со скоростью в одну тридцатую скорости света.

Испускание нейтронов в процессе деления. Фундаментальным фактом ядерного деления является испускание в процессе деления двух-трех нейтронов. Именно благодаря этому оказалось возможным практическое использование внутриядерной энергии.

Понять, почему происходит испускание свободных нейтронов, можно, исходя из следующих соображений. Известно, что относительное число нейтронов в стабильных ядрах возрастает с повышением атомного номера. Поэтому у возникающих при делении осколков отношение числа нейтронов к числу протонов оказывается бóльшим, чем это допустимо для ядер атомов, находящихся в середине таблицы Менделеева. В результате несколько нейтронов освобождается в процессе деления. Их энергия имеет различные значения — от нескольких миллионов электрон-вольт до совсем малых, близких к нулю.

Деление обычно происходит на осколки неравной массы. Осколки эти сильно радиоактивны, так как содержат избыточное количество нейтронов. В результате серии последовательных β-распадов в конце концов получаются стабильные изотопы. Одновременно образуются γ-кванты большой энергии.

В заключение отметим, что существует спонтанное деление ядер урана. Оно было открыто советскими физиками Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком: Период полураспада для спонтанного деления равен 10^{16} лет. Это в два миллиона раз больше периода полураспада при испускании ядрами урана α-частиц.

§ 141. ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

При делении ядра урана освобождаются два-три нейтрона. Это позволяет осуществить *цепную реакцию деления урана.*

Любой из нейтронов, вылетающих из ядра в процессе деления, может в свою очередь вызвать развал соседнего ядра, которое также испускает нейтроны, способные вызвать деление. В результате число делящихся ядер очень быстро увеличивается. Возникает цепная реакция.

Цепная реакция сопровождается выделением огромного количества энергии. При делении каждого ядра выделяется около 200 МэВ. При полном же делении всех ядер, имеющихся в 1 г урана, выделяется энергия $2{,}3 \cdot 10^4$ кВт · ч, что эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Но для осуществления цепной реакции нельзя использовать любые ядра, делящиеся под влиянием нейтронов. В силу ряда причин из ядер, встречающихся в природе, пригодны лишь ядра изотопа урана с массовым числом 235, т. е. $^{235}_{92}U$.

Изотопы урана. Естественный уран состоит в основном из двух изотопов: $^{235}_{92}U$ и $^{238}_{92}U$. Но изотоп $^{235}_{92}U$ составляет всего $^{1}/_{140}$ долю от более распространенного изотопа $^{238}_{92}U$.

Ядра $^{235}_{92}U$ делятся под влиянием как быстрых, так и медленных (движущихся с тепловыми скоростями) нейтронов. Ядра же $^{238}_{92}U$ могут делиться лишь под влиянием быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ. Такую энергию имеют примерно 60% нейтронов, появляющихся при делении. Однако примерно лишь один нейтрон из пяти производит деление $^{238}_{92}U$. Остальные нейтроны захватываются этим изотопом, не производя деления. В результате цепная реакция с использованием чистого изотопа $^{238}_{92}U$ невозможна.

Коэффициент размножения нейтронов. Для течения цепной реакции нет необходимости, чтобы каждый нейтрон обязательно вызывал деление ядра. Необходимо лишь, чтобы среднее число освобожденных нейтронов в данной массе урана не уменьшалось с течением времени.

Это условие будет выполнено, если *коэффициент размножения нейтронов* k больше или равен единице. Коэффициентом размножения нейтронов называют отношение числа нейтронов в каком-либо «поколении» к числу нейтронов предшествующего «поколения». Под сменой поколений понимают деление ядер, при котором поглощаются нейтроны старого «поколения» и рождаются новые нейтроны.

Если $k \geqslant 1$, то число нейтронов увеличивается с течением времени или остается постоянным и цепная реакция идет. При $k < 1$ число нейтронов убывает и цепная реакция невозможна.

Величина коэффициента размножения определяется следующими четырьмя факторами:

1) захватом медленных нейтронов ядрами $^{235}_{92}U$ с последующим делением и захватом быстрых нейтронов ядрами $^{235}_{92}U$ и $^{238}_{92}U$ также с последующим делением;

2) захватом нейтронов ядрами $^{238}_{92}U$ и $^{235}_{92}U$ без деления;

3) захватом нейтронов продуктами деления, замедлителем (о нем сказано дальше) и конструктивными элементами установки;

4) вылетом нейтронов из делящегося вещества наружу.

Лишь первый процесс сопровождается увеличением числа нейтронов (в основном за счет деления $^{235}_{92}U$). Все остальные приводят к их убыли. Цепная реакция в чистом изотопе $^{238}_{92}U$ невозможна, так как в этом случае $k < 1$ (число нейтронов, поглощаемых ядрами без деления, больше числа нейтронов, вновь образующихся за счет деления ядер).

Для стационарного течения цепной реакции коэффициент размножения нейтронов должен быть равен единице. Это равенство необходимо поддерживать с большой точностью. Уже при $k = 1{,}01$ почти мгновенно произойдет взрыв.

Образование плутония. Важное значение имеет не вызывающий деления захват нейтронов ядрами изотопа урана $^{238}_{92}U$. После захвата образуется радиоактивный изотоп $^{239}_{92}U$ с периодом полураспада 23 мин. Распад происходит с испусканием электрона и возникновением первого трансуранового элемента — *нептуния*:

$$^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + {}^{0}_{-1}e.$$

Нептуний в свою очередь β-радиоактивен с периодом полураспада около двух дней. В процессе распада нептуния образуется следующий трансурановый элемент — *плутоний:*

$$^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + {}^{0}_{-1}e.$$

Плутоний относительно стабилен, так как его период полураспада велик — порядка 24 000 лет. Важнейшее свойство плутония состоит в том, что он делится под влиянием медленных нейтронов, так же как и изотоп $^{235}_{92}U$. Поэтому с помощью плутония также может быть осуществлена цепная реакция, которая сопровождается выделением громадного количества энергии.

§ 142. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется *ядерным* (или *атомным) реактором.*

Ядра урана, особенно ядра изотопа $^{235}_{92}U$, наиболее эффективно захватывают медленные нейтроны. Вероятность захвата медленных нейтронов в сотни раз больше, чем быстрых. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на естественном уране, используют замедлители нейтронов для повышения коэффициента размножения нейтронов. Процессы в ядерном реакторе схематически изображены на рисунке 272.

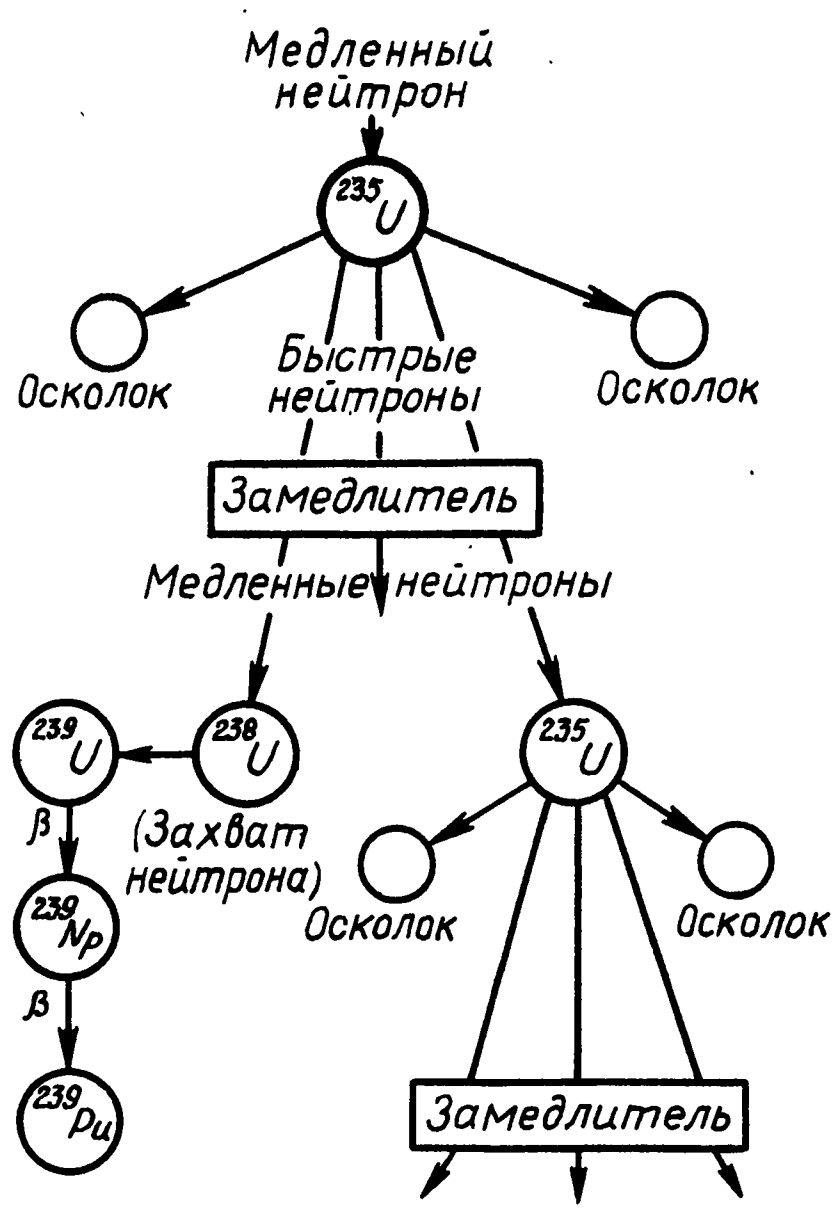


Рис. 272

Основные элементы ядерного реактора. На рисунке 273 приведена схема энергетической установки с ядерным реактором.

Основными элементами ядерного реактора являются: ядерное горючее ($^{235}_{92}U$, $^{239}_{94}Pu$, $^{238}_{92}U$ и др.), замедлитель нейтронов (тяжелая или обычная вода, графит и др.), теплоноситель для

вывода тепла, образующегося при работе реактора (вода, жидкий натрий и др.), и устройство для регулирования скорости реакции (вводимые в рабочее пространство реактора стержни, содержащие кадмий или бор — вещества, которые являются хорошими поглотителями нейтронов).

Снаружи реактор окружают защитной оболочкой, задерживающей γ-излучение и нейтроны. Оболочку выполняют из бетона с железным заполнителем.

Лучшим замедлителем является *тяжелая вода* (см. § 132). Обычная вода сама захватывает нейтроны и превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем является также графит, ядра которого не поглощают нейтронов.

Критическая масса. Коэффициент размножения k может стать равным единице лишь при условии, что размеры реактора и соответственно масса урана превышают некоторые критические значения. При малых размерах слишком велика утечка нейтронов через поверхность активной зоны реактора (объем, в котором располагаются стержни с ураном).

С увеличением размеров системы число ядер, участвующих в делении, растет пропорционально объему, а число нейтронов, теряемых вследствие утечки, увеличивается пропорционально площади поверхности. Поэтому, увеличивая систему, можно достичь значений коэффициента размножения $k \geqslant 1$. Система будет иметь критические размеры, если число нейтронов, потерянных вследствие захвата и утечки, равно числу нейтронов, полученных в процессе деления. При этом $k = 1$. Критические размеры определяются типом ядерного горючего, замедлителем и конструктивными особенностями реактора.

Для чистого (без замедлителя) урана $^{235}_{92}U$, имеющего форму шара, критическая масса равна около 50 кг. При этом радиус

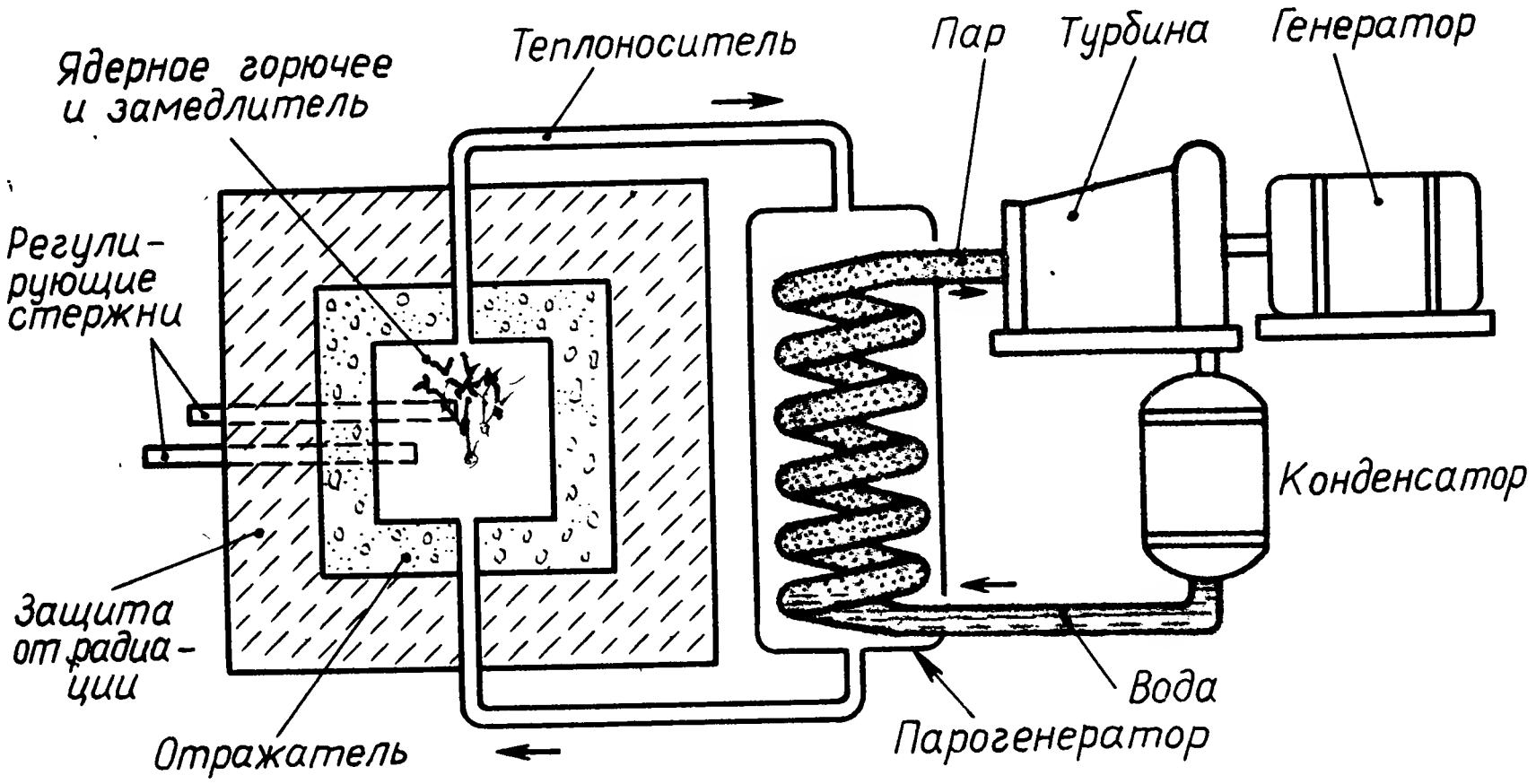


Рис. 273

Энрико Ферми (1901—1954) — великий итальянский физик, внесший большой вклад в развитие современной теоретической и экспериментальной физики. В 1938 г. эмигрировал в США. Одновременно с Дираком Ферми создал квантовую статистическую теорию электронов и других частиц (статистика Ферми — Дирака). Он построил количественную теорию β-распада — прототип современной квантовой теории взаимодействия элементарных частиц. Ферми сделал ряд фундаментальных открытий в нейтронной физике: обнаружил искусственную радиоактивность при облучении вещества нейтронами, замедление нейтронов и др. Под руководством Ферми в 1942 г. впервые была осуществлена управляемая ядерная реакция.

шара равен примерно 9 см (уран очень тяжелое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Управление реактором осуществляется при помощи стержней, содержащих кадмий или бор. При выдвинутых из активной зоны реактора стержнях $k>1$, а при полностью вдвинутых стержнях $k<1$. Вдвигая стержни внутрь активной зоны, можно в любой момент времени приостановить развитие цепной реакции.

Реакторы на быстрых нейтронах. Построены реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. Так как вероятность деления, вызванного быстрыми нейтронами, мала, то такие реакторы не могут работать на естественном уране. Реакцию можно поддерживать лишь в обогащенной смеси, содержащей не менее 15% изотопа $^{235}_{92}U$. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Эти реакторы называют *реакторами-размножителями,* так как они воспроизводят делящийся материал. Строятся реакторы с *коэффициентом воспроизводства* до 1,5. Это значит, что на 1 кг изотопа $^{235}_{92}U$ получается до 1,5 кг плутония.

В обычных реакторах также образуется плутоний, но в гораздо меньших количествах (коэффициент воспроизводства достигает 0,6—0,7).

Первые ядерные реакторы. Впервые цепная ядерная реакция деления урана была осуществлена в США коллективом ученых под руководством Энрико Ферми в декабре 1942 г.

В Советском Союзе первый ядерный реактор был пущен 25 декабря 1946 г. коллективом физиков, который возглавлял наш замечательный ученый Игорь Васильевич Курчатов.

В настоящее время созданы различные типы реакторов, отличающихся друг от друга как по мощностям, так и по своему назначению. Наиболее перспективными являются реакторы-размножители на быстрых нейтронах.

Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960) — выдающийся советский физик и организатор науки, трижды Герой Социалистического Труда. С 1943 г. Курчатов возглавлял научные работы, связанные с атомной проблемой. Под его руководством были созданы первый в Европе атомный реактор (1946) и первая советская атомная бомба (1949).

Раниие работы Курчатова относятся к исследованию диэлектриков (сегнетоэлектриков), ядерных реакций, вызываемых нейтронами, искусственной радиоактивности. Курчатов открыл изомерию искусственных радиоактивных изотопов, т. е. существование возбужденных состояний ядер с относительно большим временем жизни.

§ 143. ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Применение ядерной энергии в мирных целях впервые было осуществлено в нашей стране, когда в г. Обнинске была введена в эксплуатацию атомная электростанция мощностью 5000 кВт. Тепло, выделяемое реактором, использовалось для превращения воды в пар, приводящий в движение паровую турбину.

В настоящее время наша страна приступила к осуществлению широкой программы строительства атомных электростанций, прежде всего в европейской части СССР, где ресурсы органического топлива невелики. Введены в действие Нововоронежская, Ленинградская, Курская, Кольская и Чернобыльская АЭС. Развернуто строительство ряда других атомных электростанций. Реакторы этих электростанций работают на тепловых (т. е. медленных) нейтронах и имеют мощности 500—1000 МВт. Кроме того, в целях решения задачи по расширению топливной базы атомной энергетики сооружаются реакторы-размножители на быстрых нейтронах мощностью 600 МВт.

Впервые в нашей стране созданы атомные ледоколы с энергетическими установками большой мощности на ядерном топливе. (Первый ледокол «Ленин» был введен в эксплуатацию в 1959 г.) Такие ледоколы могут совершать плавание без пополнения запасов топлива несколько лет. Большое значение для обороны страны имеют атомные подводные лодки.

Неуправляемая цепная реакция с большим коэффициентом размножения нейтронов осуществляется в атомной бомбе.

Для того чтобы происходило почти мгновенное выделение энергии (взрыв), реакция осуществляется на быстрых нейтронах без замедлителей. В качестве взрывчатого вещества используется чистый уран $^{235}_{92}U$ или плутоний $^{239}_{94}Pu$.

Взрыв осуществляется путем создания условий, при которых размеры делящегося материала превышают критические. Это достигается либо быстрым соединением двух кусков делящегося

материала с докритическими размерами, либо же путем резкого сжатия одного куска до размеров, при которых утечка нейтронов через уменьшившуюся поверхность падает настолько, что размеры куска становятся надкритическими. То и другое осуществляется с помощью обычных взрывчатых веществ.

При взрыве бомбы температура достигает десятков миллионов градусов. Это повышение температуры ведет к огромному росту давления и образованию мощной взрывной волны. Одновременно возникает мощное излучение. Продукты цепной реакции при взрыве бомбы сильно радиоактивны и также представляют большую опасность для живых организмов.

Атомные бомбы были применены США в конце второй мировой войны против Японии. В 1945 г. были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки. Эти акты массового уничтожения людей не были вызваны военной необходимостью, так как в то время капитуляция Японии уже была предрешена.

Располагая всеми видами ядерного вооружения, Советский Союз ведет на международной арене настойчивую борьбу за запрещение средств массового уничтожения.

§ 144. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Элементы, не существующие в природе. Как уже говорилось, с помощью ядерных реакций получены радиоактивные изотопы всех химических элементов, встречающихся в природе только в стабильном состоянии. Элементы под номерами 43, 61, 85 и 87 вообще не имеют стабильных изотопов и впервые были получены искусственно. Так, например, элемент с порядковым номером $Z=43$, получивший название *технеций*, имеет самый долгоживущий изотоп с периодом полураспада около миллиона лет.

С помощью ядерных реакций и искусственной радиоактивности получены также трансурановые элементы. О *нептунии* и *плутонии* вы уже знаете. Кроме них, получены еще следующие элементы: *америций* ($Z=95$), *кюрий* ($Z=96$), *берклий* ($Z=97$), *калифорний* ($Z=98$), *эйнштейний* ($Z=99$), *фермий* ($Z=100$), *менделевий* ($Z=101$), *нобелий* ($Z=102$), *лоуренсий* ($Z=103$), *курчатовий* ($Z=104$). Курчатовий впервые синтезирован в СССР в г. Дубне. Для элемента 105 предложено название *нильсборий*. Этот элемент и элемент 106, не имеющий пока названия, синтезированы в г. Дубне.

Меченые атомы. В настоящее время все большее значение как в науке, так и в производстве получает применение радиоактивных изотопов различных химических элементов. Наибольшее значение имеет метод меченых атомов. Метод основан на том, что химические свойства радиоактивных изотопов не отличаются от свойств нерадиоактивных изотопов тех же элементов.

Обнаружить радиоактивные изотопы можно очень просто по их излучению. Радиоактивность является своеобразной меткой, с помощью которой можно проследить за поведением элемента при различных химических реакциях и физических превращениях веществ. Метод меченых атомов стал одним из наиболее действенных методов при решении многочисленных проблем биологии, физиологии, медицины и т. д. С его помощью был выяснен ряд вопросов, которые иными методами вообще вряд ли удалось бы когда-нибудь решить.

Одним из наиболее выдающихся исследований, проведенных с помощью меченых атомов, явилось исследование обмена веществ в организмах. Было доказано, что за сравнительно небольшое время организм подвергается почти полному обновлению. Слагающие его атомы заменяются новыми.

Лишь железо, как показали опыты по изотопному исследованию крови, является исключением из этого правила. Железо входит в состав гемоглобина красных кровяных шариков. При введении в пищу радиоактивных атомов железа $^{59}_{26}Fe$ было обнаружено, что они почти не поступают в кровь. Только в том случае, когда запасы железа в организме иссякают, железо начинает усваиваться организмом.

Широкое применение получили меченые атомы в агротехнике. Например, чтобы выяснить, какое из фосфорных удобрений лучше усваивается растением, помечают различные удобрения радиоактивным фосфором $^{32}_{15}P$. Исследуя затем растения на радиоактивность, можно определить количество усвоенного ими фосфора из разных сортов удобрения.

В тех случаях, когда не существует достаточно долгоживущих радиоактивных изотопов, как, например, у кислорода и азота, меняют изотопный состав стабильных элементов. Так, добавлением к кислороду избытка изотопа $^{18}_{8}O$ было установлено, что свободный кислород, выделяемый при фотосинтезе, первоначально входил в состав воды, а не углекислого газа.

Радиоактивные изотопы применяются в медицине как для постановки диагноза, так и для терапевтических целей.

Радиоактивный натрий, вводимый в небольших количествах в кровь, используется для исследования кровообращения.

Иод интенсивно отлагается в щитовидной железе, особенно при базедовой болезни. Наблюдая с помощью счетчика за отложением радиоактивного иода, можно быстро поставить диагноз. Большие дозы радиоактивного иода вызывают частичное разрушение аномально развивающихся тканей, и поэтому радиоактивный иод используют для лечения базедовой болезни.

Интенсивное γ-излучение кобальта $^{60}_{27}Co$ используется при лечении раковых заболеваний (кобальтовая пушка).

Радиоактивные изотопы в технике. Не менее обширны применения радиоактивных изотопов в технике. Ограничимся несколь-

кими примерами. Облучая поршневое кольцо нейтронами, делают его радиоактивным. Затем по радиоактивности смазочного масла, появляющейся после работы двигателя на протяжении некоторого времени, судят об износе кольца.

Радиоактивные изотопы позволяют судить о диффузии металлов, процессах в доменных печах и т. д. Мощное γ-излучение радиоактивных препаратов используют для исследования внутренней структуры металлических отливок с целью обнаружения в них дефектов.

Радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Все более широкое применение получают радиоактивные изотопы в сельском хозяйстве. Облучение семян растений (хлопчатника, капусты, редиса и др.) небольшими дозами γ-лучей от радиоактивных препаратов приводит к заметному увеличению урожайности.

Большие дозы радиации вызывают мутации у растений и микроорганизмов, что в отдельных случаях приводит к появлению мутантов с новыми ценными свойствами (радиоселекция). Так выведены ценные сорта пшеницы, фасоли и других культур, а также получены высокопродуктивные штаммы микроорганизмов, применяемые в промышленности антибиотиков. Используется также γ-излучение радиоактивных изотопов для борьбы с вредными насекомыми и для консервации пищевых продуктов.

Приготовление радиоактивных изотопов. Приготовляются радиоактивные изотопы в атомных реакторах и на ускорителях элементарных частиц. В настоящее время производством изотопов занята большая отрасль промышленности. Во всей атомной индустрии главную ценность для человечества представляет, по-видимому, получение и использование радиоактивных изотопов.

Радиоактивные изотопы в археологии. Интересное применение для определения возраста древних предметов органического происхождения (дерева, древесного угля, тканей и т. д.) получил метод радиоактивного углерода. В растениях всегда имеется β-радиоактивный изотоп углерода $^{14}_{6}C$ с периодом полураспада $T = 5700$ лет. Он образуется в атмосфере Земли в небольшом количестве из азота под действием нейтронов. Последние же возникают за счет ядерных реакций, вызванных быстрыми частицами, которые поступают в атмосферу из космоса (космические лучи). Соединяясь с кислородом, этот углерод образует углекислый газ, поглощаемый растениями, а через них и животными. Один грамм углерода из образцов молодого леса испускает около пятнадцати β-частиц в секунду.

После гибели организма пополнение его радиоактивным углеродом прекращается. Имеющееся же количество этого изотопа убывает за счет радиоактивности. Определяя процентное содержание радиоактивного углерода в органических остатках, можно определить их возраст, если он лежит в пределах от 1000 до 50 000 и даже до 100 000 лет. Таким методом узнают возраст египетских мумий, остатков доисторических костров и т. д.

§ 145. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Масса покоя ядра урана больше суммы масс покоя осколков, на которые делится ядро. Для легких ядер дело обстоит как раз наоборот. Так, масса покоя ядра гелия значительно меньше суммы масс покоя двух ядер тяжелого водорода, на которые можно разделить ядро гелия.

Это означает, что при слиянии легких ядер масса покоя уменьшается и, следовательно, должно выделяться большое количество энергии. Подобного рода реакции слияния легких ядер носят название *термоядерных реакций,* так как они могут протекать только при очень высоких температурах.

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизились на расстояние около 10^{-12} см, т. е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствует кулоновское отталкивание ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода — *дейтерия* со сверхтяжелым изотопом водорода — *тритием* выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон, в то время как при делении урана на один нуклон выделяется энергия, равная примерно 1 МэВ.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение.

По современным представлениям, на ранней стадии развития звезды она в основном состоит из водорода. Температура внутри звезды столь велика, что в ней протекают реакции слияния протонов с образованием гелия. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжелые элементы. Все эти реакции сопровождаются выделением энергии, обеспечивающей излучение света звездами на протяжении миллиардов лет.

Осуществление *управляемых термоядерных реакций* на Земле сулит человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия с тритием:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n.$$

В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ. Поскольку трития в природе нет, он должен вырабатываться в самом термоядерном реакторе из лития.

Экономически выгодная реакция, как показывают расчеты, может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов градусов при большой плотности вещества (10^{14}—10^{15} частиц в 1 см^3). Такие температуры

232

могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки на протяжении 0,1—1 с.

Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственно возможным является метод удержания высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей специальной конфигурации. Однако до сих пор полностью решить эту задачу не удалось из-за неустойчивости плазмы, которая приводит к диффузии части заряженных частиц сквозь магнитные «стенки».

В настоящее время существует уверенность в том, что в течение ближайших десяти — двадцати лет термоядерные реакторы будут созданы. Учеными нашей страны в работах, начатых под руководством Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича и продолжаемых их учениками, достигнуты наибольшие успехи на пути создания управляемых термоядерных реакций.

Пока же удалось осуществить лишь *неуправляемую реакцию синтеза* взрывного типа в водородной (или термоядерной) бомбе. Источником высокой температуры, необходимой для ядерного синтеза, здесь служит взрыв обычной атомной бомбы (урановой или плутониевой), помещенной внутри термоядерной. Технические возможности увеличения энергии взрыва термоядерных бомб практически ничем не ограничены.

§ 146. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Излучение радиоактивных веществ оказывает сильнейшее воздействие на все живые организмы. Даже сравнительно слабого излучения, энергия которого при полном поглощении повысила бы температуру тела всего лишь на 0,001° С, оказывается достаточно, чтобы нарушить жизнедеятельность клеток организма.

Живая клетка — это сложный механизм, не способный продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях отдельных его участков. Излучения же и малой интенсивности способны нанести клетке существенные повреждения. При большой дозе излучения живые организмы погибают. Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Механизм поражающего биологические объекты действия излучения еще недостаточно изучен. Но ясно, что оно сводится к ионизации атомов и молекул и это приводит к изменению их химической активности. Наиболее чувствительны к излучениям ядра клеток, особенно клеток, которые быстро делятся. Поэтому в первую очередь излучения поражают в организме костный мозг, из-за чего нарушается процесс образования крови. Далее

наступает поражение клеток пищеварительного тракта и других органов.

Сильное влияние оказывает облучение на наследственность. В большинстве случаев это влияние является неблагоприятным.

Облучение живых организмов может оказывать и определенную пользу. Быстро размножающиеся клетки в злокачественных (раковых) опухолях более чувствительны к облучению, чем нормальные. На этом основано подавление раковой опухоли γ-лучами радиоактивных препаратов, которые для этой цели более эффективны, чем рентгеновские лучи, уже применявшиеся ранее.

При работе с любым источником радиации (радиоактивные изотопы, реакторы и др.) необходимо принимать меры по радиационной защите всех людей, могущих попасть в зону действия излучения.

Самый простой метод защиты — это удаление персонала от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учета поглощения в воздухе интенсивность радиации убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника.

Наиболее сложна защита от γ-лучей и нейтронов из-за их большой проникающей способности. Лучшим поглотителем γ-лучей является свинец. Тепловые нейтроны хорошо поглощаются бором и кадмием. Быстрые нейтроны предварительно замедляются с помощью графита.

?

1. Какие силы действуют внутри ядра?
2. Что называют энергией связи ядра? Как определяется энергия связи?
3. Почему ядро атома меди устойчиво, а ядро урана неустойчиво?
4. От чего зависит значение коэффициента размножения нейтронов?
5. Для чего в ядерном реакторе используют замедлители нейтронов?
6. Что такое критическая масса?
7. Почему реакция слияния легких ядер происходит только при очень высоких температурах?
8. Как объяснить с точки зрения закона сохранения энергии, что энергия выделяется как при делении тяжелых ядер, так и при слиянии легких ядер?

УПРАЖНЕНИЕ 14

1. В результате последовательной серии радиоактивных распадов уран $^{238}_{92}U$ превращается в свинец $^{206}_{82}Pb$. Сколько α-превращений и β-превращений он при этом испытывает?
2. Период полураспада радия $T = 1600$ лет. Чему равно среднее время жизни ядра радия?
3. Во сколько раз уменьшится число автомов одного из изотопов радона за 1,91 сут? Период полураспада этого изотопа радона $T = 3{,}82$ сут.
4. Чему равна энергия связи ядра тяжелого водорода — дейтрона? Относительная атомная масса дейтрона $m_D = 2{,}0141$, протона $m_p = 1{,}00728$, нейтрона $m_n = 1{,}00866$; масса атома углерода $m_C = 1{,}995 \cdot 10^{-26}$ кг.
5. В результате деления ядра $^{235}_{92}U$, захватившего нейтрон, образуются ядра $^{142}_{56}Ba$ и $^{91}_{36}Kr$, а также три свободных нейтрона. Удельная энергия связи ядер бария 8,4 МэВ, криптона — 8,6 МэВ и урана — 7,5 МэВ. Чему равна энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана?

Глава XIII

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

§ 147. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА?

На протяжении курса физики неоднократно говорилось о существовании в природе частиц, называемых *элементарными.* Вы уже более или менее знакомы с электроном, фотоном, протоном и нейтроном. Упоминались еще позитрон и пион. Но что же такое элементарная частица?

Когда греческий философ Демокрит назвал простейшие, нерасчленимые далее частицы атомами (слово атом, напомним, означает неделимый), то ему, вероятно, все представлялось в принципе не очень сложным. Различные предметы, растения, животные построены из неделимых, неизменных частиц. Превращения, наблюдаемые в мире,— это простая перестановка атомов. Все в мире течет, все изменяется, кроме самих атомов, которые остаются неизменными.

Но в конце XIX века было открыто сложное строение атомов и был выделен электрон как составная часть атома. Затем, уже в XX веке, были открыты протон и нейтрон — частицы, входящие в состав атомного ядра. Поначалу на все эти частицы смотрели точь-в-точь, как Демокрит смотрел на атомы: их считали неделимыми и неизменными первоначальными сущностями, основными кирпичиками мироздания.

Однако ситуация привлекательной ясности длилась недолго. Все оказалось намного сложнее: как выяснилось, неизменных частиц нет совсем Сейчас просто неизвестно, какие частицы в действительности заслуживают названия элементарных, неизвестен критерий, по которому ту или иную частицу можно отнести к элементарным.

В самом слове *элементарная* заключается двоякий смысл. С одной стороны, элементарный — это само собой разумеющийся, простейший. С другой стороны, под элементарным понимается нечто фундаментальное, лежащее в основе вещей (именно в этом смысле сейчас и называют *субатомные частицы*[1] элементарными).

Считать известные сейчас элементарные частицы подобными неизменным атомам Демокрита мешает следующий простой факт. Ни одна из частиц не бессмертна. Большинство частиц, называемых сейчас элементарными, не могут прожить более двух миллионных долей секунды, даже в отсутствие какого-либо воз-

---

[1] Субатомные частицы — частицы, из которых состоят атомы.

действия извне. Свободный нейтрон (нейтрон, находящийся вне атомного ядра) живет в среднем 16 мин.

Лишь четыре частицы — фотон, электрон, протон и нейтрино — могли бы сохранять свою неизменность, если бы каждая из них была одна в целом мире.

Но у электронов и протонов имеются опаснейшие собратья — позитроны и антипротоны, при столкновении с которыми происходит взаимное уничтожение этих частиц и образование новых.

Фотон, испущенный настольной лампой, живет не более 10^{-8}с. Это то время, которое ему нужно, чтобы достичь страницы книги и поглотиться бумагой.

Лишь нейтрино почти бессмертно из-за того, что оно чрезвычайно слабо взаимодействует с другими частицами. Однако и нейтрино гибнут при столкновении с другими частицами, хотя такие столкновения случаются крайне редко.

Итак, в извечном стремлении к отысканию неизменного в нашем изменчивом мире ученые оказались не на «гранитном основании», а на «зыбком песке».

Все элементарные частицы превращаются друг в друга, и эти взаимные превращения — главный факт их существования.

Видимо, мы уже добрались до фундамента строения материи, но этот фундамент оказался совсем не застывшим в вечной неизменности, а непрерывно меняющим свое лицо, очень сложным.

Элементарные частицы уже далее неделимы, но они неисчерпаемы по своим свойствам. На неисчерпаемость свойств электрона сразу же после его открытия указывал В. И. Ленин.

Вот что заставляет так думать. Пусть у нас возникло естественное желание исследовать, состоит ли, например, электрон из каких-либо других субэлементарных частиц[1]. Что нужно сделать для того, чтобы попытаться расчленить электрон? Можно придумать только один способ. Это тот же способ, к которому прибегает ребенок, если он хочет узнать, что находится внутри пластмассовой игрушки,— сильный удар.

Разумеется, по электрону нельзя ударить молотком. Для этого можно воспользоваться другим электроном, летящим с огромной скоростью, или какой-либо иной, движущейся с большой скоростью элементарной частицей.

Современные ускорители сообщают заряженным частицам скорости, очень близкие к скорости света.

Что же происходит при столкновении частиц сверхвысокой энергии? Они отнюдь не дробятся на нечто такое, что можно было бы назвать их составными частями. Нет, они рождают новые частицы из числа тех, которые уже фигурируют в списке элементарных частиц. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем большее количество и притом более тяжелых частиц рождается.

---

[1] Подразумеваются частицы, из которых бы состояли известные сейчас элементарные частицы.

Это возможно благодаря тому, что при увеличении скорости масса частиц растет. Всего лишь из одной пары любых частиц с возросшей массой можно в принципе получить все известные на сегодняшний день частицы.

Рис. 274

На рисунке 274 вы видите результат столкновения ядра углерода, имевшего энергию 60 млрд. эВ (жирная верхняя линия), с ядром серебра фотоэмульсии. Ядро раскалывается на осколки, разлетающиеся в разные стороны. Одновременно рождается много новых элементарных частиц — пионов. Подобные реакции при столкновениях релятивистских ядер, полученных в ускорителе, впервые в мире осуществлены в 1976 г. в лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне под руководством А. М. Балдина. Лишенные электронной оболочки ядра были получены путем ионизации атомов углерода лазерным лучом.

Возможно, конечно, что при столкновениях частиц с недоступной пока нам энергией будут рождаться и какие-то новые, еще неизвестные частицы. Но сути дела это не изменит. Рождаемые при столкновениях новые частицы никак нельзя рассматривать как составные части частиц — «родителей». Ведь «дочерние» частицы, если их ускорить, могут, не изменив своей природы, а только увеличив массу, породить в свою очередь при столкновениях сразу несколько таких же в точности частиц, какими были их «родители», да еще и множество других частиц.

§ 148. ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА. АНТИЧАСТИЦЫ

Существование двойника электрона—позитрона—было предсказано теоретически английским физиком П. Дираком в 1931 г. Одновременно Дирак предсказал, что при встрече позитрона с электроном обе частицы исчезают *(аннигилируют)*, порождая фотоны большой энергии. Может протекать и обратный процесс — рождение *электронно-позитронной пары*,— например при столкновении фотона достаточно большой энергии (его масса должна быть больше суммы масс покоя рождающихся частиц) с ядром.

Спустя два года позитрон был обнаружен с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитном поле. Направление искривления трека частицы указывало знак ее заряда, а по радиусу

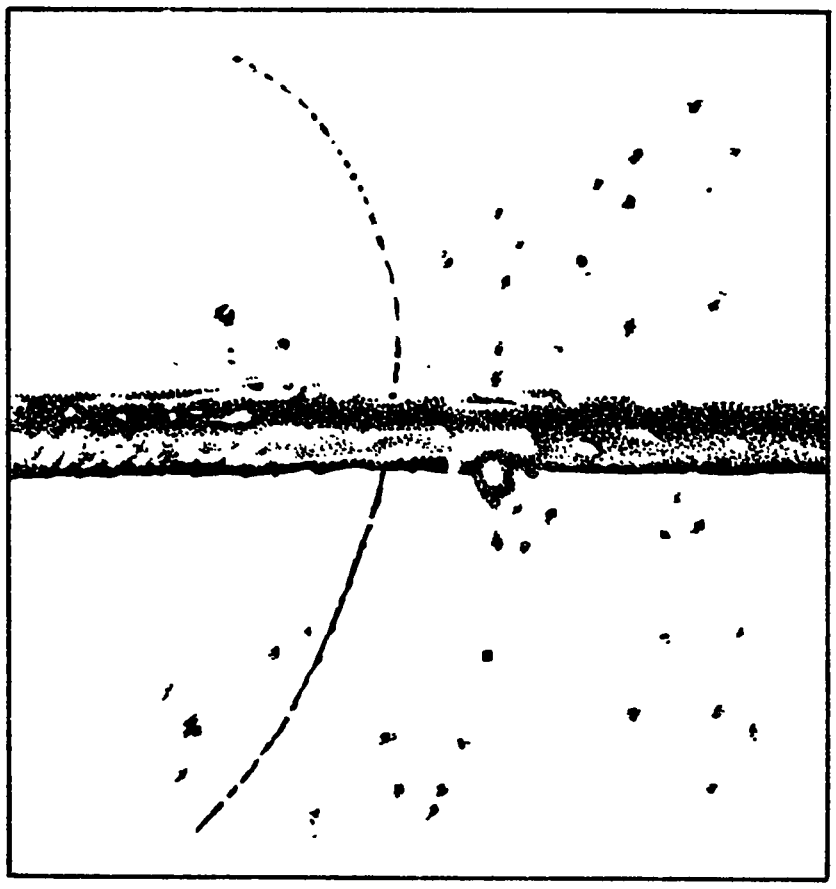


Рис. 275

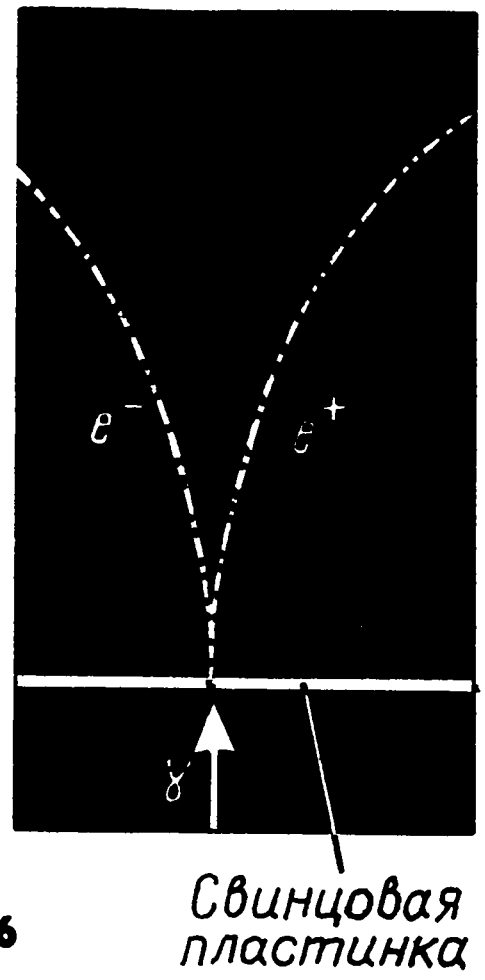


Рис. 276

кривизны и энергии частицы было определено отношение ее заряда к массе. Оно оказалось по величине таким же, как и у электрона. На рисунке 275 вы видите первую фотографию, доказавшую существование позитрона. Частица двигалась снизу вверх и, пройдя свинцовую пластинку, потеряла часть своей энергии. Из-за этого кривизна траектории увеличилась.

Процесс рождения пары электрон — позитрон γ-квантом в свинцовой пластинке виден на фотографии, приведенной на рисунке 276. В камере Вильсона, находящейся в магнитном поле, пара оставляет характерный след в виде двурогой вилки.

То, что исчезновение одних частиц и появление других при реакциях между элементарными частицами является именно превращением, а не просто возникновением новой комбинации составных частей старых частиц, особенно наглядно обнаруживается именно при аннигиляции пары электрон — позитрон. Обе эти частицы обладают определенной массой в состоянии покоя и электрическими зарядами. Фотоны же, которые при этом рождаются, не имеют зарядов и не обладают массой покоя, так как не могут существовать в состоянии покоя.

В свое время открытие рождения и аннигиляции электронно-позитронных пар вызвало настоящую сенсацию в науке. До того никто не предполагал, что электрон, старейшая из частиц, важнейший строительный материал атомов, может оказаться невечным. Впоследствии двойники (античастицы) были найдены у всех частиц. Античастицы противопоставляются частицам именно потому, что при встрече любой частицы с соответствующей античастицей происходит их аннигиляция, т. е. обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.

Обнаружены сравнительно недавно антипротон и антинейтрон. Электрический заряд антипротона отрицателен. Сейчас много-

шо известно, что рождение пар *частица — античастица* и их аннигиляция не составляют монополии электронов и позитронов.

Атомы, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка — из позитронов, образуют антивещество. В 1969 г. в СССР был впервые получен *антигелий*.

При аннигиляции антивещества с веществом энергия покоя (см. § 101) превращается в кинетическую энергию образующихся частиц излучения.

Энергия покоя — самый грандиозный и концентрированный резервуар энергии во Вселенной.

И только при аннигиляции она полностью высвобождается, превращаясь в другие виды энергии. Поэтому антивещество — самый совершенный источник энергии, самое калорийное «горючее». В состоянии ли будет человечество когда-либо это «горючее» использовать, трудно сейчас сказать.

§ 149. РАСПАД НЕЙТРОНА. ОТКРЫТИЕ НЕЙТРИНО

Природа β-распада. При β-распаде из ядра вылетает электрон. Но электрона в ядре нет. Откуда же он берется? После вылета электрона из ядра заряд ядра, а значит, и число протонов увеличиваются на единицу. Массовое число ядра не меняется. Это означает, что число нейтронов уменьшается на единицу. Следовательно, внутри β-радиоактивных ядер нейтрон способен распадаться на протон и электрон. Протон остается в ядре, а электрон вылетает наружу. Только в стабильных ядрах нейтроны устойчивы.

Но вот что странно. Совершенно тождественные ядра испускают электроны различной энергии. Вновь образующиеся ядра, однако, совершенно одинаковы независимо от того, какова энергия испущенного электрона. Это, по-видимому, противоречит закону сохранения энергии — самому фундаментальному физическому закону! Энергия исходного ядра оказывается неравной сумме энергий конечного ядра и электрона.

Гипотеза Паули. Швейцарский физик В. Паули предположил, что вместе с протоном и электроном при распаде нейтрона рождается какая-то частица-«невидимка», которая уносит с собой недостающую энергию. Частица эта не регистрируется приборами, потому что она не несет электрического заряда и не имеет массы покоя. Значит, она не способна производить ионизацию атомов, расщеплять ядра, т. е. не может вызвать эффекты, по которым можно судить о появлении частицы.

Конечно, нелепо утверждать, будто частица, какой бы необычной она ни была, вообще ни с чем не взаимодействует. Иначе введение такой частицы в физику означало бы замаскированный отказ от закона сохранения энергии. Выходило бы, что энергия теряется вместе с частицей безвозвратно и навсегда. Вот почему Паули предположил, что гипотетическая частица просто очень

слабо взаимодействует с веществом и поэтому может пройти сквозь большую толщу вещества, не обнаружив себя.

Эту частицу Ферми назвал *нейтрино,* что означает «нейтрончик». Масса покоя нейтрино, как и предсказывал Паули, оказалась равной нулю. За этими словами кроется простой смысл: покоящихся нейтрино нет. Едва успев появиться на свет, они сразу движутся со скоростью 300 000 км/с. Подсчитали, как взаимодействуют нейтрино с веществом в слое определенной толщины. Результат оказался далеко не утешительным в смысле возможности обнаружить эту частицу экспериментально. Земной шар для нейтрино более прозрачен, чем самое лучшее стекло для света.

Распад свободного нейтрона. Роль нейтрино не сводится только к объяснению β-распада ядер. Очень многие элементарные частицы в свободном состоянии самопроизвольно распадаются с испусканием нейтрино. Прежде всего так ведет себя нейтрон. Только в ядрах нейтрон за счет взаимодействия с другими нуклонами приобретает стабильность. Свободный же нейтрон живет в среднем 16 мин. Это было экспериментально доказано лишь после того, как были построены ядерные реакторы, дающие мощные пучки нейтронов.

Как и другие частицы, нейтрино (символ ν) имеет античастицу, называемую антинейтрино (символ $\bar{\nu}$). При распаде нейтрона на протон и электрон излучается именно антинейтрино:

$$n \to p + e^- + \bar{\nu}.$$

Энергия нейтрона всегда больше суммы энергий протона и электрона. Избыточная энергия уносится с антинейтрино.

Экспериментальное открытие нейтрино. Несмотря на свою неуловимость, нейтрино (точнее, антинейтрино) после почти 26 лет его «призрачного существования» в научных журналах было открыто экспериментально. Теория предсказала, что при попадании антинейтрино в протон возникнут позитрон и нейтрон:

$$p + \bar{\nu} \to n + e^+.$$

Вероятность такого процесса мала из-за чудовищной проникающей способности антинейтрино. Но если антинейтрино будет очень много, то можно надеяться их обнаружить. Громадное количество антинейтрино возникает при работе ядерного реактора, когда при делении ядер урана образуется множество β-радиоактивных осколков с малым временем жизни. И вот возле реактора (опыт был проведен в США в 1956 г.) в землю был закопан ящик со свинцово-парафиновыми стенками. В ящике было 200 л воды, окруженной слоем жидкого сцинтиллятора (около 300 л), который давал вспышки при прохождении сквозь него γ-квантов.

Позитрон, появившийся при попадании антинейтрино в один из протонов молекулы воды (точка *A* на рисунке 277), немедленно аннигилирует с одним из электронов (точка *B*), давая два γ-кванта. Гамма-кванты вызывают вспышки сцинтиллятора, ко-

торые регистрируются специальными приборами. Рожденный при реакции нейтрон после некоторого блуждания захватывается ядром кадмия (точка *C*), специально добавленного к воде. После этого ядро кадмия излучает несколько γ-квантов, сигнализируя тем самым о появлении нейтрона. По возникновению сначала двух разлетающихся в разные стороны γ-квантов, а потом, спустя небольшой промежуток времени, еще нескольких γ-квантов было установлено существование антинейтрино с той степенью достоверности, какая только возможна в мире элементарных частиц.

Рис. 277

Сущность распада элементарных частиц. Заметим в заключение, что распад нейтрона и других частиц представляет собой превращение в мире элементарных частиц, а не разъединение сложной системы на составные части.

Отношение частиц-потомков к частице-предку совсем не напоминает отношение разбитого горшка к целому сосуду. В случае распада нейтрона, например, это очевидно: так как антинейтрино существует лишь в движении по прямой со скоростью света, то оно содержаться внутри нейтрона не может. Возникающие же при распаде нейтрона протон и электрон могут образовать устойчивую систему. Однако это будет хорошо известный и превосходно изученный атом водорода, а не нейтрон.

Так же обстоит дело и с другими частицами, живущими лишь определенный интервал времени. Распад частицы совсем не является признаком того, что она не элементарна. Нейтрон, несмотря на свою нестабильность, считается элементарной частицей, а ядро атома тяжелого водорода — *дейтрон*, вне всяких сомнений, состоит из нейтрона и протона, хотя он и стабилен.

§ 150. СКОЛЬКО СУЩЕСТВУЕТ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ?

Сомнения в том, что все частицы, называемые сейчас элементарными, оправдывают свое наименование, очень велики. Часть из них, возможно даже большая часть, носит это название вряд ли заслуженно. Основание для сомнений просто: этих частиц очень много.

Открытие новой элементарной частицы всегда составляло и сейчас составляет выдающийся триумф науки. Но уже довольно

давно к каждому очередному триумфу начала примешиваться доля беспокойства. Триумфы стали следовать буквально друг за другом. Сейчас уже открыто 35 *стабильных* и относительно стабильных частиц с временем жизни, не меньшим 10^{-17} с. Число же *короткоживущих частиц* с временем жизни порядка 10^{-22}—10^{-23} с (их называют *резонансами)* перевалило за двести.

В настоящее время все 35 частиц разделены на группы и включены в таблицу элементарных частиц в порядке возрастания их массы покоя.

Таблица открывается *фотоном.* Фотон, оставаясь в одиночестве, образует первую группу.

Следующая группа состоит из легких частиц — *лептонов.* В нее входят восемь частиц: два сорта нейтрино (одни нейтрино рождаются с электронами,

Таблица элементарных частиц

	Наименование частиц	Символ: частица	Символ: античастица	Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Время жизни (с)
	Фотон	γ	γ	0	0	стабилен
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\overline{\nu}_e$	0	0	стабильно
	Нейтрино мю-мезонное	ν_μ	$\overline{\nu}_\mu$	0	0	стабильно
	Электрон	e^-	e^+	1	—1	стабилен
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,7	—1	$2{,}2\cdot10^{-6}$
Мезоны	Пи-мезоны	π^0	π^0	264,1	0	$0{,}8\cdot10^{-16}$
		π^+	π^-	273,1	1	$2{,}6\cdot10^{-8}$
	Ка-мезоны	K^+	K^-	966;4	1	$1{,}23\cdot10^{-8}$
		K^0	$\overline{K}^0$	974,1	0	K_s^0—$0{,}86\cdot10^{-10}$; K_L^0—$5{,}38\cdot10^{-8}$
	Эта-ноль мезон	η^0	η^0	1074	0	10^{-17}
Барионы	Протон	p	$\overline{p}$	1836,1	1	стабилен
	Нейтрон	n	$\overline{n}$	1838,6	0	10^3
	Гиперон лямбда	Λ^0	$\overline{\Lambda}^0$	2184,1	0	$2{,}5\cdot10^{-10}$
	Гипероны сигма	Σ^+	$\overline{\Sigma}^+$	2327,6	1	$0{,}8\cdot10^{-10}$
		Σ^0	$\overline{\Sigma}^0$	2333,6	0	10^{-14}
		Σ^-	$\overline{\Sigma}^-$	2343,1	—1	$1{,}49\cdot10^{-10}$
	Гипероны кси	Ξ^0	$\overline{\Xi}^0$	2572,8	0	$3{,}03\cdot10^{-10}$
		Ξ^-	$\overline{\Xi}^-$	2585,6	—1	$1{,}66\cdot10^{-10}$
	Омега-минус-частица	Ω^-	$\overline{\Omega}^-$	3273	—1	$1{,}3\cdot10^{-10}$

а другие — вместе с μ-мезонами), электрон, μ-мезон (его масса примерно в 207 раз больше массы электрона) и их античастицы.

Далее следуют *мезоны.* Эта группа также состоит из 8 частиц. Наиболее легкие из них π-мезоны: положительные, отрицательные и нейтральные. Их массы составляют 264 (π^0) и 273 (π^+, π^-) электронных масс. Пионы являются квантами ядерного поля, подобно тому как фотоны — кванты электромагнитного поля. Еще имеются четыре K-мезона и один η^0-мезон.

Последняя группа — *барионы* — является самой обширной. В нее входят 18 частиц из 35. Самыми легкими из барионов являются протоны и нейтроны. За ними следуют так называемые гипероны. Вся таблица замыкается Ω^- (омега минус)-частицей, открытой в 1964 г. Ее масса в 3273 раза больше массы электрона.

Существование большого числа частиц заставляет думать, что не все они в равной мере элементарны. Многие из них, вероятно, являются составными. Какие именно, пока достоверно неизвестно. Во всяком случае, уже сейчас предложена модель, согласно которой многие элементарные частицы построены всего лишь из шести фундаментальных частиц, называемых *кварками,* — трех кварков и трех антикварков. Кварки должны иметь дробные электрические заряды. Так называемому p-кварку приписывается заряд $+^2/_3\,e$, а n- и λ-кваркам — заряды $-^1/_3\,e$ (где e — заряд электрона). Протон состоит из двух p-кварков и одного n-кварка; нейтрон — из двух n-кварков и одного p-кварка; пионы — из комбинаций кварк — антикварк и т. д. Однако до сих пор кварки не обнаружены экспериментально.

?

1. Электрон — самая легкая из заряженных частиц. Какой из известных вам законов сохранения запрещает превращение электрона в фотоны?

2. При аннигиляции медленно движущихся электрона и позитрона образовалось два γ-кванта. Под каким углом друг к другу они разлетаются?

3. Какова частота γ-квантов, возникающих при указанных в предыдущем вопросе условиях?

4. Почему свободный нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино, а свободный протон не может распасться на нейтрон, позитрон и нейтрино?

5. Можно ли в камере Вильсона наблюдать трек заряженной частицы со временем жизни 10^{-23} с?

ЗНАЧЕНИЕ ФИЗИКИ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ МИРА И РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СИЛ ОБЩЕСТВА

§ 151. ЕДИНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Итак, изучение школьного курса физики вами закончено. В большей или меньшей степени каждый из вас приобщился к результатам той огромной работы по изучению различных форм движения материи, строения и свойств материальных тел, которая была проделана на протяжении многих веков учеными всего мира.

Физика знакомит нас с наиболее общими законами природы, управляющими течением процессов в окружающем нас мире и во Вселенной в целом.

Цель физики заключается в отыскании общих законов природы и в объяснении конкретных процессов на их основе. По мере продвижения к этой цели перед учеными постепенно вырисовывалась величественная и сложная картина единства природы. Мир представляет собой не совокупность разрозненных, независимых друг от друга событий, а разнообразные и многочисленные проявления одного целого.

Механическая картина мира. Многие поколения ученых поражала и продолжает поражать величественная и цельная картина мира, которая была создана на основе механики Ньютона. Согласно Ньютону, весь мир состоит «из твердых, весомых, непроницаемых, подвижных частиц». Эти «первичные частицы абсолютно тверды: они неизмеримо более тверды, чем тела, которые из них состоят, настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются вдребезги». Отличаются они друг от друга главным образом количественно, своими массами. Все богатство, все качественное многообразие мира—это результат различий в движении частиц. Внутренняя сущность частиц остается на втором плане.

Основанием для такой единой картины мира послужил всеобъемлющий характер открытых Ньютоном законов движения тел. Этим законам с удивительной точностью подчиняются как громадные небесные тела, так и мельчайшие песчинки, гонимые ветром. И даже ветер — движение не видимых глазом частиц воздуха — подчиняется тем же законам. На протяжении долгого времени ученые были уверены, что единственными фундаментальными законами природы являются законы механики Ньютона. Так, французский ученый Л а г р а н ж считал, что «нет человека счастливее Ньютона; ведь только однажды, одному человеку суждено построить картину мира».

Однако простая механическая картина мира оказалась несостоятельной. При исследовании электромагнитных процессов выяснилось, что они не подчиняются механике Ньютона.

Максвелл открыл новый тип фундаментальных законов, которые не сводятся к механике Ньютона; это законы поведения электромагнитного поля.

Электромагнитная картина мира. В механике Ньютона предполагалось, что тела непосредственно через пустоту действуют друг на друга и эти взаимодействия осуществляются мгновенно (теория дальнодействия). После создания электродинамики представления о силах существенно изменились. Каждое из взаимодействующих тел создает электромагнитное поле, которое с конечной скоростью распространяется в пространстве. Взаимодействие осуществляется посредством этого поля (теория близкодействия).

Электромагнитные силы чрезвычайно широко распространены в природе. Они действуют в атомном ядре, атоме, молекуле, между отдельными молекулами в макроскопических телах. Это происходит потому, что в состав всех атомов входят электрически заряженные частицы. Действие электромагнитных сил обнаруживается и на очень малых расстояниях (ядро) и на космических (электромагнитное излучение звезд).

Развитие электродинамики привело к попыткам построить *единую электромагнитную картину мира.* Все события в мире согласно этой картине управляются законами электромагнитных взаимодействий.

Кульминации электромагнитная картина мира достигла после создания специальной теории относительности. Было понято фундаментальное значение конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий, создано новое учение о пространстве и времени, найдены релятивистские уравнения движения, заменяющие уравнения Ньютона при больших скоростях.

Если во времена расцвета механической картины мира делались попытки свести электромагнитные явления к механическим процессам в особой среде (мировом эфире), то теперь уже стремились, наоборот, вывести законы движения частиц из электромагнитной теории. Частицы вещества пытались рассматривать как «сгустки» электромагнитного поля.

Однако свести все процессы в природе к электромагнитным не удалось. Уравнения движения частиц и закон гравитационного взаимодействия не могут быть выведены из теории электромагнитного поля. Кроме того, были открыты электрически нейтральные частицы и новые типы взаимодействия. Природа оказалась сложнее, чем предполагали вначале: ни единый закон движения, ни единственная сила не способны охватить всего многообразия процессов в мире.

Единство строения материи. Мир настолько разнообразен, что несомненно все тела не могут состоять из частиц одного сорта.

Но, как это ни удивительно, вещество звезд точно такое же, как и вещество, из которого состоит Земля. Атомы, слагающие все тела Вселенной, совершенно одинаковы. Живые организмы состоят из тех же атомов, что и неживые.

Все атомы имеют одинаковую структуру и построены из элементарных частиц трех сортов. У них есть ядра из протонов и нейтронов, окруженные электронами. Взаимодействие между ядрами и электронами осуществляется электромагнитным полем, квантами которого являются фотоны.

Взаимодействие же между протонами и нейтронами в ядре осуществляют в основном π-мезоны, которые представляют собой кванты ядерного поля. При распаде нейтронов появляются нейтрино. Кроме того, открыто много других элементарных частиц. Но только при взаимодействии частиц очень больших энергий они начинают играть заметную роль.

В первой половине XX века был открыт фундаментальный факт: **все элементарные частицы способны превращаться друг в друга.**

После открытия элементарных частиц и их превращений на первый план единой картины мира выступило единство в строении материи. В основе этого единства лежит материальность всех элементарных частиц. **Различные элементарные частицы — это различные конкретные формы существования материи.**

Современная физическая картина мира. Единство мира не исчерпывается единством строения материи. Оно проявляется и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий тел друг с другом, в природе, по современным данным, имеется лишь четыре типа сил. Это *гравитационные силы, электромагнитные, ядерные* и *слабые взаимодействия.* Последние проявляются главным образом при превращении элементарных частиц друг в друга. С проявлением всех четырех типов сил мы встречаемся в в безграничных просторах Вселенной, в любых телах на Земле (в том числе и в живых организмах), в атомах и атомных ядрах, при всех превращениях элементарных частиц.

Революционное изменение классических представлений о физической картине мира произошло после открытия квантовых свойств материи. С появлением квантовой физики, описывающей движение микрочастиц, начали вырисовываться новые элементы единой физической картины мира.

Разделение материи на вещество, имеющее прерывное строение, и непрерывное поле потеряло абсолютный смысл. Каждому полю соответствуют кванты этого поля: электромагнитному полю — фотоны, ядерному — π-мезоны и т. д. В свою очередь все частицы обладают волновыми свойствами. **Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.**

Описание, казалось бы, взаимоисключающих корпускулярных и волновых свойств в рамках одной теории оказалось возможным благодаря тому, что законы движения всех без исключения микрочастиц носят статистический (вероятностный) характер. Этот факт делает невозможным однозначное предсказание того или иного поведения микрообъектов.

Принципы квантовой теории являются совершенно общими, применимыми для описания движения всех частиц, взаимодействий между ними и их взаимных превращений.

Итак, современная физика с несомненностью демонстрирует нам черты единства природы. Но все же многого, быть может даже саму физическую суть единства мира, уловить пока еще не удалось. Неизвестно, почему столь много различных элементарных частиц. Почему они имеют определенные массы, заряды и другие характеристики? До сих пор все эти величины определяются экспериментально. Только начинает намечаться связь между различными типами взаимодействий. По всей вероятности, мы стоим на пороге новых великих открытий. Если для описания движения частиц в атомах потребовалось создание квантовой механики с ее необычными законами, то для создания единой теории элементарных частиц, объясняющей все их свойства, потребуется, возможно, еще более радикальная теория. Произойдет ли это через годы или через десятки лет, нельзя сказать.

«Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, еще не удалось проникнуть в них, и радость творческих исканий и открытий все еще продолжает существовать». Эти слова, сказанные Галилеем три с половиной столетия назад, нисколько не устарели.

§ 152. ФИЗИКА И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ [1]

В настоящее время происходит величайшая научно-техническая революция, которая началась приблизительно четверть века назад. Она произвела глубокие качественные изменения во многих областях науки и техники. Одна из древнейших наук—астрономия переживает революцию, связанную с выходом человека в космическое пространство. Возникновение молекулярной биологии и генетики вызвало революцию в биологии, а создание так называемой большой химии стало возможным благодаря революции в химической науке. Аналогичные процессы происходят также в геологии, метеорологии, океанологии и многих других современных науках.

Глубокие качественные перемены происходят в наши дни и во всех основных отраслях техники. Революция в энергетике связана, в частности, с переходом от тепловых электростанций, рабо-

[1] Этот параграф написан В. А. Лешковцевым.

тающих на органическом топливе, к атомным электростанциям. В области материаловедения она обусловлена созданием индустрии искусственных материалов с необычными, но очень важными для практики свойствами. Комплексная механизация и автоматизация ведут нас к неизбежной революции в промышленности и сельском хозяйстве. Транспорт, строительство, связь становятся принципиально новыми, значительно более производительными и совершенными отраслями современной техники.

Научно-техническая революция коренным образом изменила роль науки в жизни общества. Наука стала непосредственной производительной силой. Теперь и в будущем судьба производства необходимых людям материальных благ непосредственно будет зависеть от научных открытий и достижений науки.

Научно-техническая революция неизбежно ведет человечество к грандиозной перестройке и совершенствованию всех сфер производства. В социалистическом мире в ходе этой революции создается материально-техническая база коммунизма.

Физика является одним из лидеров современного естествознания. Она оказывает огромное влияние на различные отрасли науки, техники, производства. Рассмотрим на нескольких примерах, как физика влияет на другие области науки и техники.

На протяжении тысячелетий астрономы получали только ту информацию о небесных явлениях, которую им приносил видимый свет. Можно сказать, что они изучали эти явления через узенькую щель в обширном спектре электромагнитных излучений. Два десятилетия тому назад благодаря развитию радиофизики возникла радиоастрономия, необычайно расширившая наши представления о Вселенной. Она помогла нам узнать о существовании многих космических объектов, о которых ранее не было известно. Дополнительным источником астрономических знаний стал новый участок электромагнитной шкалы, лежащий в диапазоне радиоволн. Сейчас создаются основы нейтринной астрономии, которая будет доставлять ученым сведения о процессах, происходящих в недрах космических тел, например в глубинах нашего Солнца. Она же поможет решить проблему существования антимиров (миров из античастиц) в пределах Метагалактики. Создание нейтринной астрономии стало возможным только благодаря успехам физики атомных ядер и элементарных частиц.

Огромный поток научной информации, которую приносят из космоса другие виды электромагнитного излучения, не достигает Земли, поглощаясь в ее атмосфере. С выходом человека в космическое пространство родились новые разделы астрономии, меняющие ее облик,— ультрафиолетовая и инфракрасная астрономия, рентгеновская астрономия, гамма-астрономия, а также необычайно расширилась возможность исследования первичных космических лучей, падающих на границу земной атмосферы. В ходе этой революции астрономы впервые получают возможность исследовать все виды частиц и излучений, приходящих из

космического пространства. Объем научной информации, полученной астрономами за последние десятилетия, намного превысил объем информации, добытой за всю прошлую историю астрономии. Используемые при этом методы исследования и регистрирующая аппаратура заимствуются астрономами из арсенала современной физики; древняя астрономия превращается в молодую, бурно развивающуюся астрофизику.

Революцию в биологии обычно связывают с возникновением молекулярной биологии и генетики, изучающих жизнь на предельно малых частицах живого — молекулах. Основные средства и методы, используемые молекулярной биологией для обнаружения, выделения и изучения своих объектов (электронные и протонные микроскопы, рентгеноструктурный анализ, электронография, нейтронный анализ, меченые атомы, ультрацентрифуги и т. п.), заимствованы у физики. Не располагая этими средствами, родившимися в физических лабораториях, биологи не сумели бы осуществить прорыв на качественно новый уровень исследования процессов, протекающих в живых организмах. Следовательно, роль физики в создании молекулярной биологии и генетики имеет определяющий характер.

Не менее важную роль играет современная физика в революционной перестройке химии, геологии, океанологии и ряда других естественных наук.

Физика стоит также у истоков революционных преобразований во всех областях техники. На основе ее достижений перестраиваются энергетика, связь, транспорт, строительство, промышленное и сельскохозяйственное производство.

Революция в энергетике вызвана возникновением атомной энергетики. Атомные электростанции извлекают из «топлива» в миллион раз большую долю энергии, чем тепловые электростанции. Запасы энергии, хранящиеся в атомном топливе, намного превосходят запасы энергии в еще не израсходованном обычном топливе. Уголь, нефть и природный газ в наши дни превратились в уникальное сырье для большой химии. Сжигать их в больших количествах — значит наносить непоправимый ущерб этой важной области современного производства. В отличие от них уран и торий до сих пор не получили каких-либо существенных промышленных применений, и использование этих веществ не наносит ущерба другим отраслям промышленности. Таковы основные преимущества атомной энергетики.

Термоядерные электростанции в будущем навсегда избавят человечество от заботы об источниках энергии. Как мы уже знаем, научные основы атомной и термоядерной энергетики целиком опираются на достижения физики атомных ядер.

Техника будущего будет создаваться не из готовых природных материалов, которые уже в наши дни не могут сделать ее достаточно надежной и долговечной, а из синтетических материалов с наперед заданными свойствами. В создании таких мате-

риалов наряду с большой химией все возрастающую роль будут играть физические методы воздействия на вещество (электронные, ионные и лазерные пучки; сверхсильные магнитные поля; сверхвысокие давления и температуры; ультразвук и т. п.). В них заложена возможность получения материалов с предельными характеристиками и создания принципиально новых методов обработки вещества, коренным образом изменяющих технологию современных производств.

Промышленность и сельское хозяйство все более превращаются в комплексно-автоматизированные производства. Комплексная автоматизация опирается на разнообразную электронную управляющую и контрольно-измерительную аппаратуру, без которой она просто немыслима. Научные основы этой аппаратуры, так же как и их практическая реализация, органически связаны с радиоэлектроникой, физикой твердого тела, физикой атомного ядра и рядом других разделов современной физики.

Физика вносит решающий вклад в создание современной вычислительной техники. Все три поколения электронных вычислительных машин (на вакуумных лампах, полупроводниках и интегральных схемах [1]), созданные до наших дней, родились в физических лабораториях. Современная физика открывает новые перспективы для дальнейшей миниатюризации, увеличения быстродействия и надежности электронных вычислительных машин. Применение лазеров и развивающейся на их основе голографии таит в себе огромные резервы для совершенствования вычислительной техники.

Мы рассказали здесь далеко не о всех сторонах революционизирующего влияния физики на различные области науки и техники. Но и приведенных нами примеров достаточно, чтобы убедиться в том, что современная физика вносит решающий вклад в научно-техническую революцию.

Осуществление принципа коммунизма «от каждого — по способностям, каждому — по потребностям» возможно лишь на основе дальнейшего прогресса науки и техники, базирующегося на знании фундаментальных законов природы, и в первую очередь законов физики.

---

[1] В интегральных схемах вместо обычных радиодеталей и соединяющих их проводов используются тонкие слои молекул определенного сорта, вводимых внутрь кристаллика полупроводника или напыляемых на его поверхность. Благодаря этому можно, например, сделать радиоприемник размером со спичечную головку.

ЗАДАЧИ НА ПОВТОРЕНИЕ

1. На вращающемся диске закреплены два шарика. Угол между радиус-векторами, проведенными от оси диска к шарикам, равен 90°. Какова разность фаз гармонических колебаний их теней, если шарики проецируются на экран с помощью пучка света, параллельного плоскости диска?

Какова разность фаз при углах между радиус-векторами 60°, 180° и 240°?

2. Будет ли изменяться период колебаний маятника с песочницей, изображенного на рисунке 8, по мере высыпания песка?

3. Изменится ли период колебания шарика, подвешенного на пружине, если ему сообщить положительный электрический заряд и поместить в однородное электрическое поле, силовые линии которого направлены вертикально вниз?

4. При больших амплитудах колебаний маятника его период зависит от амплитуды. Увеличивается или уменьшается период с возрастанием амплитуды?

5. Чему равен период T колебаний маятника длиной l в лифте, который движется с ускорением a, направленным вверх?

6. Можно ли пользоваться часами с маятником на космическом корабле?

7. За какую долю периода T груз на пружине, отклоненный от положения равновесия на 2 см, пройдет первый сантиметр пути?

8. Шарик совершает гармонические колебания с амплитудой 5 см и периодом 0,2 с. Найти максимальные значения скорости и ускорения.

9. Шарик, подвешенный на нити в вагоне поезда, будет раскачиваться из-за толчков на стыках рельсов. При какой скорости поезда амплитуда колебаний будет наибольшей, если длина рельсов 12,5 м, а длина нити 44 см?

10. Определить число оборотов в секунду прямоугольной рамки, вращающейся в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого $B=0{,}5$ Т, если амплитуда наведенной в рамке ЭДС $\mathcal{E}_M=10$ В. Площадь рамки $S=200$ см^2, число витков рамки $N=20$.

11. На конденсаторе, включенном в колебательный контур, действующее значение напряжения $U=100$ В. Емкость конденсатора $C=10$ пФ. Определить максимальные значения электрической и магнитной энергии при электрических колебаниях в контуре.

12. Последовательно с активным сопротивлением $R=1$ кОм включены катушка с индуктивностью $L=0{,}5$ Г и конденсатор емкостью $C=1$ мкФ. Определить индуктивное сопротивление X_L, емкостное сопротивление X_C и полное сопротивление Z переменному току при частотах $\nu_1=50$ Гц и $\nu_2=10$ кГц.

13. Звук выстрела и пуля одновременно достигают высоты $H=680$ м. Какова начальная скорость пули? Выстрел произведен вертикально вверх; сопротивление движению пули не учитывать. Скорость звука v принять равной 340 м/с.

14. Скорость звука относительно земли при попутном ветре 380 м/с, а при встречном 320 м/с. Чему равны скорость звука относительно воздуха и скорость ветра относительно земли?

15. Разность хода двух когерентных волн с одинаковыми амплитудами равна 12 см, а длина волны 8 см. Каков результат интерференции волн?

16. Электромагнитные волны распространяются в некоторой среде со скоростью $v=2\cdot10^8$ м/с. Какова длина волны в этой среде, если частота колебаний $\nu=1$ МГц?

17. Контур радиоприемника настроен на радиостанцию, несущая частота которой $\nu_1=9$ МГц. Во сколько раз нужно изменить емкость конденсатора колебательного контура приемника, чтобы он был настроен на волну $\lambda_2=50$ м?

18. Лист бумаги установлен параллельно стене на расстоянии 2 м от нее. Какова площадь тени листа, если точечный источник света расположен напротив середины листа на расстоянии 3 м от стены? Площадь листа 0,06 м^2.

19. Определить полный световой поток точечного источника, сила света которого 100 кд.

20. Вычислить световой поток, падающий от точечного источника на площадку в 16 см^2, отстоящую от источника на 2 м, если полный световой поток источника 250 лм.

21. Освещенность книжной страницы размером 21×14 см составляет 50 лк. Какой световой поток падает на страницу?

22. Какова сила света лампы, подвешенной на высоте 15 м, если освещенность непосредственно под лампой равна 4 лк?

23. Световые лучи падают на пластину перпендикулярно. На какой угол нужно ее наклонить, чтобы освещенность уменьшилась вдвое? Как изменится световой поток, попадающий на пластину?

24. На какой высоте над чертежной доской следует повесить лампу силой света 250 кд, чтобы получить освещенность доски под лампой 50 лк? Наклон доски к горизонту 30°.

25. Стол диаметром 1 м освещается лампой, висящей на высоте $h=1$ м над центром стола. Какова освещенность края стола, если полный световой поток, посылаемый лампой, равен 600 лм?

26. На высоте 8 м над землей висит лампа силой света 1000 кд. Найти площадь участка, в пределах которого освещенность не меньше, чем 1 лк.

27. Под каким углом должен падать световой луч на плоское зеркало, чтобы отраженный луч составлял с падающим угол 30°?

28. Зеркальный гальванометр расположен на расстоянии 4 м от шкалы. На какой угол повернулось зеркальце, если зайчик сместился от центра шкалы на 10 см?

29. Определить показатель преломления скипидара, если известно, что при угле падения 45° угол преломления равен 30°.

30. При падении на плоскую границу двух сред с показателями преломления n_1 и n_2 луч частично отражается, частично преломляется. При каком угле падения отраженный луч перпендикулярен преломленному лучу?

31. На какое расстояние сместится луч, пройдя плоскопараллельную пластину толщиной 1 см? Угол падения луча 60°, угол преломления 30°.

32. Определить, во сколько раз истинная глубина водоема больше кажущейся, если смотреть по вертикали вниз.

33. Точечный источник света расположен на глубине 1 м. Показатель преломления воды равен 1,33. Каков радиус круга на поверхности воды, в пределах которого возможен выход лучей в воздух?

34. Определить предельный угол полного отражения при падении луча на границу стекло — вода. Показатель преломления стекла — 1,5, воды — 1,33.

35. Собирающая линза дает на экране действительное изображение источника света с увеличением в 5 раз. Каким будет увеличение, если, не трогая линзы, поменять местами источник и экран?

36. Расстояние между источником и экраном равно 0,5 м. Линза дает четкое изображение источника при двух ее положениях, расстояние между которыми 0,1 м. Каково фокусное расстояние линзы?

37. С помощью собирающей линзы получают на экране сначала увеличенное изображение пламени свечи, а затем уменьшенное. Высота увеличенного изображения — 96 мм, уменьшенного — 6 мм. Считая расстояние между свечой и экраном неизменным, определить высоту пламени.

38. Расстояние от предмета до фокуса собирающей линзы равно 5 см, расстояние от изображения до другого фокуса равно 45 см. Определить фокусное расстояние линзы.

39. Светящаяся точка находится на расстоянии 4 см от собирающей линзы и на расстоянии 1 мм от оптической оси. На каком расстоянии от оси будет расположено изображение точки, если фокусное расстояние линзы 6 см?

40. Предмет расположен на расстоянии 70 см от двояковогнутой линзы с фокусным расстоянием 35 см. Во сколько раз изображение меньше предмета?

41. На каком расстоянии друг от друга нужно поместить две одинаковые собирающие линзы оптической силой по 4 дптр, чтобы параллельный пучок, падающий на эту систему, по выходе из нее остался параллельным?

42. Собирающая линза с фокусным расстоянием 40 см находится на расстоянии 30 см от рассеивающей линзы. Параллельный пучок лучей, падающий

на эту систему линз, по выходе из нее остается параллельным. Найти фокусное расстояние рассеивающей линзы.

43. Доказать, что фронт преломленной волны является плоским, если на поверхность раздела падает плоская волна.

44. Известны так называемые квазизвездные объекты (квазары), свет от которых доходит до Земли за время около 3 млрд. лет (предположительно). На каком расстоянии находятся эти объекты?

45. На дифракционную решетку с периодом $d=0{,}02$ мм падает плоская монохроматическая волна зеленого света ($\lambda=5{,}5\cdot10^{-5}$ см). Определить угол отклонения лучей для спектра первого порядка. Волновая поверхность падающей волны параллельна плоскости решетки.

46. Сколько фотонов содержит электромагнитное излучение с энергией 1 эрг, если длина волны равна $6\cdot10^{-5}$ см?

47. Определить энергию и массу фотонов, которым соответствуют длины волн: а) $\lambda_1=6\cdot10^{-5}$ см (видимый свет); б) $\lambda_2=10^{-8}$ см (рентгеновское излучение); в) $\lambda_3=0{,}1\cdot10^{-9}$ см (γ-излучение).

48. Работа выхода электрона с поверхности цезия равна 1,89 эВ. Какова максимальная скорость фотоэлектронов, если длина волны света, освещающего поверхность металла, равна $5{,}89\cdot10^{-5}$ см?

49. Какова напряженность электрического поля на первой и четвертой боровских орбитах в атоме водорода?

50. Вычислить силу кулоновского притяжения и гравитационную силу, действующие между электроном и ядром в атоме водорода, находящемся в невозбужденном состоянии.

51. Разрядная трубка наполнена водородом при низком давлении. При каком напряжении на электродах будет происходить возбуждение атомов?

52. Пары ртути в разрядной трубке начинают излучать при напряжении на электродах 4,9 В. Какова длина волны возникающего излучения?

53. Определить энергию электрона, если радиус кривизны его трека в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле с индукцией 0,007 Т, составляет 3 см.

54. Препарат полония испускает в секунду $3{,}7\cdot10^9$ α-частиц с энергией 5,3 МэВ. Полоний помещен в калориметр с теплоемкостью 1 кал/К. Определить, на сколько увеличилась температура калориметра за 1 ч.

55. Период полураспада полония ${}^{210}_{8}\mathrm{Po}$ равен 140 сут. При испускании α-частицы полоний превращается в стабильный свинец. Сколько свинца образуется в 1 мг полония за 100 сут в результате распада?

56. Записать ядерную реакцию, происходящую при бомбардировке α-частицами алюминия ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$, если известно, что эта реакция сопровождается испусканием нейтрона.

57. Записать ядерную реакцию, происходящую при бомбардировке α-частицами бора ${}^{11}_{5}\mathrm{B}$. Реакция сопровождается испусканием нейтрона.

58. Определить энергию покоя, соответствующую атомной единице массы (а. е. м.), т. е. $^1/_{12}$ массы атома углерода.

59. Выделяется или поглощается энергия при следующих реакциях:

$$ {}^{6}_{3}\mathrm{Li}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\to{}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{3}_{2}\mathrm{He}, \qquad {}^{7}_{3}\mathrm{Li}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\to{}^{10}_{5}\mathrm{B}+{}^{1}_{0}n? $$

Относительные атомные массы изотопов ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$, ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$, ${}^{10}_{5}\mathrm{B}$ соответственно равны 1,00783; 3,01602; 4,00260; 6,01513; 7,01601 и 10,01294. Масса нейтрона 1,00866 а. е. м.

60. Определить энергию, выделяющуюся при реакции:

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\to{}^{3}_{1}\mathrm{H}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}. $$

Относительные атомные массы изотопов водорода ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ и ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ равны соответственно: 1,00783; 2,01410; 3,01605.

61. Какова наименьшая частота излучения, способного вызвать рождение пары электрон — позитрон?

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. Определение ускорения свободного падения при помощи маятника

Приборы и материалы: шарик с отверстием, нить, штатив с муфтой и кольцом, часы с секундной стрелкой, измерительная лента.

Указания к работе.

1. Установить на краю стола штатив. У его верхнего конца укрепить с помощью муфты кольцо и подвесить к нему шарик на нити. Шарик должен висеть на расстоянии 1—2 см от пола.
2. Возбудить колебания маятника, отклонив шарик в сторону на 5—8 см и отпустив его.
3. Подсчитать число n периодов за время t, равное 1—1,5 мин.
4. Измерить лентой длину l маятника.
5. Рассчитать ускорение свободного падения по формуле

$$g = \frac{4\pi^2 / n^2}{t^2}.$$

6. Оценить погрешность.

2. Изучение закона отражения света

Приборы и материалы: лампочка на подставке, батарея аккумуляторов, выключатель, плоское зеркальце, экран со щелью, угольник, транспортир, белая бумага, соединительные провода.

Указания к работе

1. Собрать электрическую цепь, присоединив лампочку к батарее через выключатель.
2. Установить перед лампочкой экран со щелью, а за ним положить лист чистой бумаги.
3. Замкнуть цепь и получить яркую, тонкую полоску света на бумаге (световой луч).
4. Поставить на пути луча вертикально плоское зеркало.
5. Прочертить карандашом на бумаге линию вдоль зеркала и отметить начало луча у щели, его конец у зеркала и одну точку на отраженном луче.
6. Выключить ток; снять зеркало.
7. Начертить падающий и отраженный лучи и перпендикуляр к линии зеркала в точке падения луча.
8. Измерить транспортиром углы падения и отражения.
9. Повторить опыт несколько раз для разных положений зеркала и сформулировать вывод о соотношении между углом отражения и углом падения.

3. Определение показателя преломления стекла

Приборы и материалы: лампочка на подставке, батарея аккумуляторов, выключатель, стеклянная пластина с двумя боковыми плоскими параллельными гранями, экран со щелью, угольник, транспортир, бумага белая, соединительные провода.

Указания к работе

1. Собрать электрическую цепь, присоединив лампочку к батарее через выключатель.
2. Установить перед лампочкой экран со щелью, а за ним положить лист белой бумаги.
3. Замкнуть цепь и получить яркую, тонкую полоску света на бумаге (световой луч).
4. Положить поперек полоски света стеклянную пластину.

5. Прочертить караидашом на бумаге линии вдоль преломляющих граней и отметить начало A и конец B падающего луча, а также точку C. выхода луча из стеклянной пластины (рис. 278).

6. Разомкнуть цепь и снять пластину.

7. Начертить падающий и преломленный лучи и перпендикуляр к пластине в точке падения.

8. Измерить углы падения α и преломления β транспортиром.

9. Вычислить показатель преломления по формуле

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

10. Повторить опыт при других углах падения и сопоставить результаты.

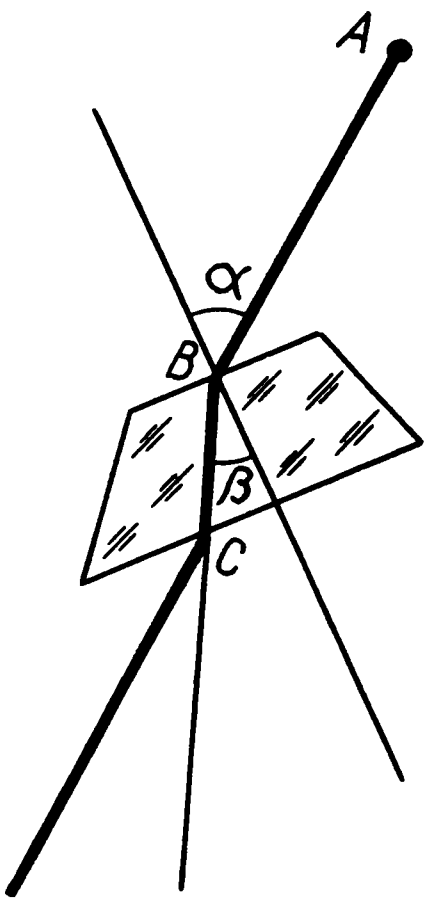


Рис. 278

4. Получение изображений при помощи вогнутых зеркал

Приборы и материалы: вогнутое зеркало, полоска бумаги с начерченной стрелкой.

Указания к работе

1. Придвинуть бумажную полоску вплотную к зеркалу. Постепенно отдаляя ее, наблюдать за изменением размера мнимого прямого изображения стрелки.

2. Выполнить построение изображения для данного случая.

3. Отодвинуть зеркало на расстояние вытянутой руки и расположить глаз на главной оптической оси зеркала.

4. Закрыв другой глаз, подвести сверху к оптической оси зеркала бумажную полоску и обнаружить действительное обратное изображение.

5. Передвигая полоску вдоль оптической оси, наблюдать за изменением размера изображения.

6. Построить уменьшенное, увеличенное и равное предмету действительные изображения.

5. Получение действительных изображений при помощи линзы

Приборы и материалы: длиннофокусная собирающая линза, сетка миллиметровая на стекле, измерительная лента, направляющая рейка, вогнутое зеркало с наклеенной на тыльной стороне буквой, матовое стекло.

Указания к работе

1. Получить на матовом стекле при помощи линзы действительное изображение какого-либо удаленного предмета.

2. Измерить расстояние между линзой и матовым стеклом.

Это расстояние можно считать приблизительно равным фокусному расстоянию линзы.

3. Установить зеркало с наклеенной буквой тыльной стороной к линзе на двойном фокусном расстоянии от нее.

4. Поместить стекло с миллиметровой сеткой по другую сторону линзы. Все приборы расположить вдоль направляющей рейки.

5. Способом параллакса совместить миллиметровую сетку с изображением буквы. Для этого расположить глаз на главной оптической оси за сеткой. Слегка смещая глаз вправо-влево и вверх-вниз, наблюдать за движением изображения относительно сетки. При некотором положении сетки изображение

не смещается относительно сетки. Это значит, что сетка и изображение точно совпадают.

6. Измерить по делениям сетки ширину и высоту изображения буквы, а также высоту самой буквы.

7. С помощью измерительной ленты определить расстояние от изображения до линзы.

8. Найти отношение линейных размеров предмета к соответствующим линейным размерам изображения, а затем отношение расстояния от линзы до предмета к расстоянию от линзы до изображения. Сопоставить оба отношения между собой и сформулировать вывод.

9. Повторить опыт, немного придвинув букву к линзе.

6. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы

Приборы и материалы: лампочка на подставке, батарея аккумуляторов, выключатель, измерительная лента, длиннофокусная собирающая линза, экран белый со щелью, направляющая рейка, соединительные провода.

Указания к работе

1. Составить электрическую цепь, подключив лампочку к батарее через выключатель.

2. Поставить лампочку на край стола, а экран — у другого края. Между ними поместить линзу.

3. Включить лампочку и передвигать линзу вдоль рейки, пока на экране не будет получено резкое изображение светящейся нити лампочки.

4. Измерить расстояние от лампочки до линзы и от линзы до экрана.

5. Вычислить главное фокусное расстояние линзы по формуле

$$F = \frac{fd}{f + d}$$

и оптическую силу линзы

$$D = \frac{1}{F}.$$

6. Установить лампочку на произвольном расстоянии d_1 от линзы.

7. Зная фокусное расстояние F, вычислить по формуле

$$f_1 = \frac{d_1 F}{d_1 - F}$$

расстояние f_1, на котором должно находиться изображение.

8. Проверить полученный результат на опыте.

9. Повторить последний эксперимент, расположив лампочку на расстоянии $d_2 = 2F$ от линзы.

7. Сборка модели микроскопа

Приборы и материалы: длиннофокусная собирающая линза, короткофокусная собирающая линза, сетка миллиметровая на стекле, направляющая рейка, вогнутое зеркало с наклеенной на тыльной стороне буквой из бумаги.

Указания к работе

1. Установить вдоль рейки короткофокусную собирающую линзу (объектив) около хорошо освещеиой буквы на расстоянии, немного большем фокусного расстояния, которое должно быть заранее известно.

2. Отыскать с помощью сетки методом параллакса (см. работу 5) действительное увеличеиное обратное изображение буквы.

3. Расположить вторую линзу (окуляр) вдоль рейки за изображением на расстоянии, равном ее фокусному расстоянию или немного меньшем (фокусиое расстояние окуляра также должно быть известным заранее).

Убрав сетку, наблюдать увеличенное изображение буквы через окуляр как через лупу.

8. Наблюдение явления разложения света при помощи призмы

Приборы и материалы: проекционный аппарат, спектральные трубки с водородом, неоном или гелием, высоковольтный индуктор, батарея аккумуляторов, штатив, соединительные провода (эти приборы являются общими для всего класса), стеклянная пластина со скошенными гранями (выдается каждому).

Указания к работе

1. Расположить пластину горизонтально перед глазом. Сквозь грани, составляющие угол в 45°, наблюдать светлую вертикальную полоску на экране — изображение раздвижной щели проекционного аппарата.
2. Выделить основные цвета полученного сплошного спектра и записать их в наблюдаемой последовательности.
3. Повторить опыт, рассматривая полоску через грани, образующие угол в 60°. Записать различия в виде спектров.
4. Наблюдать линейчатые спектры водорода, гелия или неона, рассматривая светящиеся спектральные трубки сквозь грани стеклянной пластины. Записать наиболее яркие линии спектров.

9. Наблюдение явления интерференции света

Приборы и материалы: пластины стеклянные — 2 шт.

Указания к работе

1. Стеклянные пластины тщательно протереть, сложить вместе и сжать пальцами.
2. Рассматривать пластины в отраженном свете на темном фоне (располагать их надо так, чтобы на поверхности стекла не образовывались слишком яркие блики от окон или от белых стен).
3. В отдельных местах соприкосновения пластин наблюдать яркие радужные кольцеобразные или неправильной формы полосы.
4. Заметить изменения формы и расположения полученных интерференционных полос с изменением нажима.
5. Попытаться увидеть картину интерференции в проходящем свете.

10. Наблюдение явления дифракции света

Приборы и материалы: лампа с прямой нитью накала (одна на весь класс), штангенциркуль.

Указания к работе

1. Установить между губками штангенциркуля щель шириной 0,5 мм.
2. Приставить щель вплотную к глазу, расположив ее вертикально.
3. Смотря сквозь щель на вертикально расположенную светящуюся нить лампы, наблюдать по обе стороны нити радужные полосы (дифракционные спектры).
4. Изменяя ширину от 0,55 до 0,8 мм, заметить, как это влияет на дифракционные спектры [1].

---

[1] Если штангенциркулей нет, можно использовать стеклянные фотопластинки с черным эмульсионным слоем, в котором предварительно прорезают щели различной ширины.

ОТВЕТЫ

Упражнение 1

1. $\approx 15{,}8$ Н/м. 2. ≈ 20 с. 3. 9 см; 25 см. 4. Увеличится в 2,4 раза. 5. Второй шарик. 6. 0,4 м. 7. $\approx 31{,}4$ см/с; $\approx -15{,}7$ см/с. 8. ≈ 9 рад/с; $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ Дж; $\approx 17{,}9$ см/с. 9. $T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$. 10. 19,2 км/ч.

Упражнение 2

1. $5 \cdot 10^{-3}$ Дж. 2. $\approx 1{,}26 \cdot 10^{-6}$ с; $\approx 2{,}51 \cdot 10^{-6}$ с. 3. 16—10 мГ. 4. $\approx 0{,}63$ В. 5. $\approx 0{,}63$ В. 6. $\approx 0{,}28$ А. 7. 155 Ом. 8. $\approx 37°$. 9. 0,2 А; ≈ 4 мА. 11. 15 мкф.

Упражнение 3

1. Прослойки между пластинами должны быть перпендикулярны оси вала. 2. ЭДС максимальна, когда плоскость рамки параллельна линиям магнитной индукции. 4. Можно, например, намотать поверх одной из обмоток дополнительную обмотку с известным числом витков и измерить напряжение на ее концах при подаче на другую обмотку известного напряжения: 5. Трансформатор может сгореть, так как сопротивление обмотки постоянному току гораздо меньше, чем переменному. 6. Сопротивление одного витка очень мало. В витке возникает большой индукционный ток. Большое количество выделенной теплоты разрушает трансформатор. 7. 24 пары. 8. $^1/_{10}$; $^{22}/_7$; $^{35}/_6$; $^{300}/_{11}$. 9. 96%.

Упражнение 4

1. 660 м. 2. ≈ 5000 м/с. 3. 1435 м/с. 4. 180°. 5. 425 Гц. 6. Увеличится приблизительно в 4,2 раза.

Упражнение 5

1. Нельзя, так как в системе отсчета, относительно которой скорость упорядоченного движения электронов равна нулю, ионы решетки движутся и создают магнитное поле. 2. Не возникнут. 3. От $\lambda_1 \approx 92$ м до $\lambda_2 \approx 565$ м. 4. Так как антенна горизонтальна, вектор напряженности электрического поля также расположен горизонтально. Следовательно, вектор магнитной индукции вертикален. 5. На Луне отсутствует ионосфера!

Упражнение 6

1. Световой пучок не будет виден. 2. Солнечное затмение выглядит как частичное: Луна закрывает часть диска Солнца. 3. Явление обусловлено прямолинейностью распространения света сквозь малое отверстие в ставне. 4. Размеры полутени зависят от расстояния от непрозрачной преграды до экрана. При малом расстоянии (ноги) полутень мала, а при большом (голова) — велика. Если бы фонарь был точечным источником, тени от головы и ног были бы одинаково резкими. 5. От 1,2 м до 1 м. 6. На расстоянии 1,6 м от источника I_1. Не изменится. 7. ≈ 27 лк; $\approx 25{,}6$ лк.

Упражнение 7

2. $x = \frac{lH}{H+h}$. 4. $H/2$. Нижний край зеркала должен отстоять от пола на расстоянии, равном половине расстояния глаз от пола. Верхний край зеркала должен находиться на высоте, меньшей роста человека на величину, равную половине расстояния от глаз до макушки. 5. Плоское зеркало дает направленное отражение, поэтому каждому зрителю будет видна лишь ярко освещенная малая часть кинокадра. 7. Станет менее ярким, в остальном не изменится. 8. $d = 2|F|$. 9. Вогнутое, действительное.

Упражнение 8

1. 0,55; 1,24. **2.** 1,4 см. **3.** В сторону вершины преломляющего угла призмы. **4.** Нельзя, так как в воде часть света будет выходить через те грани, от которых в воздухе происходило полное отражение. **5.** Через другую короткую грань текст не виден, так как лучи испытывают, попадая на нее, полное отражение. Через длинную грань текст виден. **6.** Не выйдет. **7.** $n=2$.

Упражнение 9

1. Линза является собирающей, а изображение действительным. **2.** 12 см. **3.** Изображение будет таким же четким, но его освещенность уменьшится. **5.** Показатель преломления воды очень близок к показателю преломления вещества глаза, поэтому лучи, попадающие в глаз, почти не преломляются и, следовательно, глаз становится очень дальнозорким. **7.** 0,3 м. **8.** 1) Рассеивающая, мнимое; 2) собирающая, мнимое. **10.** $\Gamma=7$. **11.** На расстоянии $F/2$.

Упражнение 10

1. $\approx k \cdot 528$ об/с (где $k=1, 2, 3, \ldots$). **2.** $5{,}26 \cdot 10^{-7}$ м; 225 200 км/с; $2{,}98 \cdot 10^{-7}$ м; 223 200 км/с. **3.** Пятно будет светлым. **4.** $\approx 5{,}2 \cdot 10^{-7}$ м

Упражнение 11

1. С точки зрения наблюдателя на Земле, удар молнии в точке B (позади поезда) произошел раньше. **2.** Скорость электрона меньше скорости света приблизительно на 10 см/с. **3.** $\approx 0{,}23 \cdot 10^{-11}$ кг.

Упражнение 12

2. $\approx 1{,}5$. **3.** $\approx 4 \cdot 10^{-19}$ Дж. **4.** $\approx 2{,}5 \cdot 10^{-7}$ м. **5.** $\approx 5 \cdot 10^{14}$ Гц. **6.** $\approx 3{,}8 \times \times 10^{-19}$ Дж. **7.** $\approx 1{,}325 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с.

Упражнение 13

1. $\frac{r_k}{r_n} = 25$; $\frac{E_k}{E_n} = {}^1/_{25}$. **2.** $\approx 2 \cdot 10^6$ м/с; $\approx 10^{23}$ м/с. **3.** $\approx 6{,}9 \times 10^{-14}$ м. **4.** $\approx 4{,}87 \cdot 10^{-7}$ м. **5.** $\approx 3{,}65 \cdot 10^{-7}$ м.

Упражнение 14

1. Восемь α-превращений, шесть β-превращений. **2.** ≈ 2240 лет. **3.** В 1,41 раза. **4.** $\approx 1{,}72$ МэВ. **5.** $\approx 212{,}9$ МэВ.

Задачи для повторения

1. $\pi/2$, $\pi/3$, π, $4\pi/3$. **2.** По мере высыпания песка центр тяжести будет сначала опускаться, т. е. будет увеличиваться длина маятника, а значит, и его период. Потом центр тяжести будет подниматься, а период колебаний маятника — уменьшаться. После высыпания песка период остается неизменным.

3. Не изменится. **4.** Период увеличивается. **5.** $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g+a}}$. **6.** Нельзя, так как в состоянии невесомости часы не пойдут, а при работе двигателя период колебаний маятника будет зависеть от ускорения корабля. **7.** $T/6$. **8.** $\approx 1{,}57$ м/с; $\approx 49{,}3$ м/с^2. **9.** $\approx 33{,}8$ км/ч. **10.** ≈ 8 об/с. **11.** 10^{-7} Дж. **12.** При частоте 50 Гц, $X_L = 157$ Ом, $X_C \approx 3{,}18$ кОм, $Z \approx 3{,}19$ кОм; при частоте 10 кГц, $X_L = 31{,}4$ кОм, $X_C \approx 15{,}9$ Ом, $Z \approx 31{,}4$ кОм. **13.** ≈ 350 м/с. **14.** 350 м/с; 30 м/с. **15.** Волны гасят друг друга. **16.** 200 м. **17.** Увеличить в 2,25 раза. **18.** 0,54 м^2. **19.** ≈ 1257 лм. **20.** $\approx 8 \cdot 10^{-3}$ лм. **21.** $\approx 1{,}5$ лм. **22.** 900 кд. **23.** На 60°; уменьшится в два раза. **24.** $\approx 2{,}1$ м. **25.** ≈ 34 лк. **26.** ≈ 1055 м^2. **27.** 15°. **28.** $\approx 43'$. **31.** 5,8 мм. **33.** $\approx 1{,}13$ м. **34.** $\approx 62°24'$. **35.** 0,2. **36.** 12 см. **37.** 24 мм. **38.** 15 см. **39.** 3 мм. **40.** В 3 раза. **41.** 0,5 м. **42.** $|F| = 10$ см. **44.** $\approx 7{,}6 \cdot 10^{22}$ км. **45.** $\approx 1°35'$. **46.** $\approx 3 \cdot 10^{11}$. **47.** а) $\approx 2{,}07$ эВ, $\approx 3{,}68 \cdot 10^{-33}$ г; б) 12,41 кэВ, $\approx 22{,}07 \cdot 10^{-30}$ г; в) $\approx 1{,}24$ МэВ; $\approx 22{,}07 \cdot 10^{-28}$ г. **48.** $\approx 2{,}78 \cdot 10^5$ м/с. **49.** $\approx 5 \cdot 10^{11}$ В/м; $\approx 2 \cdot 10^9$ В/м. **50.** $\approx 8 \cdot 10^{-8}$ Н; $\approx 4 \cdot 10^{-47}$ Н. **51.** $\approx 10{,}15$ В. **52.** $\approx 0{,}25$ мкм. **53.** ≈ 3900 эВ. **54.** На 2,7 К. **55.** $\approx 0{,}38$ мг. **58.** ≈ 935 МэВ. **59.** Выделяется: поглощается. **60.** ≈ 4 МэВ. **61.** $\approx 2{,}4 \cdot 10^{20}$ Гц.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Автоколебания 30, 62
Аккомодация глаза 161
Акустика 85
Альфа-частица 258
Амплитуда 14
Антивещество 293
Антигелий 293
Антинейтрино 294
Антинейтрон 292
Антипротон 292
Античастица 292
Атомы меченые 283

Барионы 297
Бета-лучи 259
Близорукость 162
Бомба атомная 283
— водородная 287

Взаимодействие сильное 270
— электромагнитное 105
Вибратор Герца 109
Видеосигнал 123
Вода тяжелая 265
Волны 76—100
— звуковые 85
— когерентные 95
— механические 76
— отраженные 96
— плоские 83
— поперечные 77
— продольные 77
— стоячие 98
— —, пучность 99
— —, узел 99
— сферические 84
— электромагнитные 78, 103, 107
Воспроизведение звука 236
Время собственное 198
Высота звука 90

Гамма-лучи 259
Генератор индукционный 65
— ламповый 60
— переменного тока 65
Гидролокатор 92
Гипотеза Максвелла 104
— Паули 293
— Планка 224
Гипероны 296
Глаз 160
Глубина резкости 159
Граница фотоэффекта красная 229
Громкость 89

Давление света 232
Дальнозоркость 163
Дейтерий 265
Деление урана 275
Демодуляция 114,117
Детектирование (см. Демодуляция)
Диафрагма 158
Динамика релятивистская 203
Диоптрия 154
Дисперсия света 170
Дифракция волн 101
— рентгеновских лучей 221
— света 178
Дифракционная картина 180
— решетка 182
Длина волны 81
— — световой 174

Зависимость массы от скорости 203
Закон отражения волн 97, 98
— — света 136
— преломления света 144, 168
— радиоактивного распада 264
— сложения скоростей релятивистский 202
Законы фотоэффекта 226
Замедление времени (см. Относительность промежутков времени)
Замедлитель нейтронов 279
Запись звука 236
— —, звуковая дорожка 236
Затвор фотографический 158
Звук музыкальный 89
Зеркало плоское 136
— сферическое 138
— — вогнутое 140
— — выпуклое 139

Излучение 210
— индуцированное 249
— тепловое 210
Изображение действительное 140, 151
— мнимое 137, 151
Изотопы 264
Иконоскоп 123
—, мозаичный экран 123
Интерференционная картина 95
Интерференция волн 93
— звука 95
— света 172
Интерферометр 193
Инфразвук 91
Ионосфера 120
Источник света 210
— — точечный 132

Камера Вильсона 255
Кандела 133
Камертон 89
Кварки 297
Кинескоп 123
Когерер 112
Колебания 5
— вынужденные 7, 25, 34
— гармонические 13, 40
— затухающие 24
— механические 5
— свободные 6, 34
— электрические 33
Колебательный контур 35
— — открытый 109
Кольца Ньютона 173
Косинус фи (см. Коэффициент мощности)

Коэффициент мощности 54
— размножения нейтронов 278
— трансформации 67

Лазеры 249
— газовые 252
— непрерывного действия 251
— полупроводниковые 252
—, принцип действия 250
— рубиновые 251
— —, устройство 251
Лептоны 296
Линза 150
— рассеивающая 153
— собирающая 151
— тонкая 150
Лупа 163
Луч 83
— световой 129
— — отраженный 136
— — падающий 136, 143
— — преломленный 143
Лучи инфракрасные 218
— рентгеновские 219
— ультрафиолетовые 218
Люкс 133
Люмен 133

Масса критическая 280
— покоя 204
Маятник математический 9
Мезоны 296
Метод толстослойных эмульсий 256
Микроскоп 164
Модель атома планетарная 241
— — Томсона 238
— ядра капельная 276
— — протонно-нейтронная 269
Модуляция 114
— амплитудная 114, 116
— частотная 116
Мощность переменного тока 53
— — — мгновенная 53
— — — средняя 54

Нейтрино 294
Нейтрон 268

Объектив 158, 159
Окуляр 164
Оптика геометрическая 128, 129, 130
— лучевая (см. Оптика геометрическая)
— просветленная 176
Оптическая ось 139, 150
— — главная 139, 150
— побочная 139, 150
Опыт Майкельсона 93
— Резерфорда 239
— Юнга 179
Опыты Герца 110
— Франка и Герца 247
Орбита электронов 243
— — боровские (см. Орбиты электронов дозволенные)
— — дозволенные 243
Освещенность 133
Относительность одновременности 195
— промежутков времени 197
— расстояний 199
Отражение света 136
— — полное 146
Очки 162

Пара электронно-позитронная 291
Период дифракционной решетки 182
— колебаний 15
— полураспада 263
Плотность оптическая 144
Плутоний 279
Поверхность волновая 83
Позитрон 291
Показатель преломления света 144
— — — абсолютный 144
— — — относительный 144
Поле электромагнитное 104
Полутень 130
Поляризация волн 119, 186
— света 183
Поляроид 186
Поперечность световых волн 187
Постоянная Планка 224
Постулаты Бора 243
— теории относительности 194
Правило смещения 266
Преломление света 143
Призма треугольная 148
Принцип Гюйгенса 96, 102
— относительности Эйнштейна 194
Проекционный аппарат 159
— —, конденсор 159
Протон 241
Пузырьковая камера 255

Работа выхода 228
Радиоактивность естественная 257
— искусственная 272
Радиоволны 120
— длинные 120
— короткие 120
— средние 120
— ультракороткие 120
Радиолокатор 121
Радиолокация 121
— Луны 122
— планет 122
Радиоприемник А. С. Попова 113
Радиосвязь 114
Развертка колебаний временная 33, 41; 89
Разность фаз 20
Распад нейтрона 293
Расстояние наилучшего зрения 161
Реактор ядерный 279
Реакции термоядерные 286
— ядерные 274
— — цепные 277
Резонанс 27, 55
— акустический 90
Ротор 66
Рупор 98

Свет естественный 186
— плоскополяризованный 186
Световой квант (см. Фотон)
— поток 131
Связь массы и энергии 207
— радиотелефонная 114
Сила света 132
— оптическая линзы 154
— тока, амплитуда 43
— —, действующее значение 44
— —, мгновенное значение 43
Силы ядерные 269

Синхрофазотрон 205
Система отсчета инерциальная 194
Скорость волны 77, 81.
— звука 87
— света 166
Сокращение лоренцово (см. Относительность расстояний)
Сопротивление электрическое активное 43
— — емкостное 47
— — индуктивное 49
— — полное 52
Спектр 210
— излучения 214
— линейчатый 215
— непрерывный 215
— поглощения 217
— полосатый 216
Спектральный анализ 216
— аппарат 213
Спектрограф 214
Спектроскоп 214
Спутник связи 124
Статор 66
Стерадиан 132
Субчастицы 289
Счетчик Гейгера 254

Телевидение 123
Тень 130
Теория относительности 189
— — специальная 189
— света волновая 127
— — квантовая 224
— — корпускулярная 127
— — электромагнитная 187
— фотоэффекта 228
Теория Френеля 179
Ток электрический переменный 21, 64
Тон 89
Трансформатор 67
Триод 59
—, потенциал запирания 59
—, характеристика сеточная 59
Тритий 265
Трубка рентгеновская 222

Увеличение линейное 157
Угол зрения 165
— отражения 136
— падения 134
— полного отражения предельный 148
— преломления 143
— преломляющий призмы 149
— телесный 132
Ультразвук 91
Уровни энергетические 245

Фаза 18
Фокальная плоскость 140
Фокус главный 140, 152
— действительный 139, 152
— мнимый 140, 154
Фокусное расстояние 140, 152
Формула Гюйгенса 22
— линзы 156
— Томсона 38
Фотоаппарат 158
Фотография 158, 234
Фотолюминесценция 211
Фотометрия 131
Фотон 229
Фотореле 232
Фотосинтез 234
Фототелеграф 125
Фототок 226
— насыщения 226
Фотоэлемент 231
Фотоэффект 225
— внешний 232
— внутренний 232

Хемилюминесценция 211

Центр оптический 138

Частицы элементарные 253, 289
Частота колебаний 15
— — циклическая 16
— несущая 114
— собственная 16, 22, 38
Частотомер 30

Шум 90

Электролюминесценция 210
Электростанция 70
— атомная 71
— гидравлическая 71, 72
— тепловая 71, 72
Энергия покоя 209
— связи 270
— — удельная 270
Энергосистема 74
Эпидиаскоп 160
Эфир мировой 191
Эфирный ветер 191

Ядро атомное 253

ОГЛАВЛЕНИЕ

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Введение 3

Глава I. **Механические колебания** 5

§ 1. Свободные и вынужденные колебания . . . . . —
§ 2. Условия возникновения свободных колебаний . . 7
§ 3. Математический маятник 9
§ 4. Уравнение движения тела, колеблющегося под действием силы упругости . . 11
§ 5. Уравнение движения математического маятника . . 12
§ 6. Гармонические колебания 13
§ 7. Связь между гармоническими колебаниями и движением по окружности . . 17
§ 8. Фаза колебаний 18
§ 9. Скорость и ускорение при гармонических колебаниях 21
§ 10. Зависимость частоты и периода свободных гармонических колебаний от свойств системы 22
§ 11. Превращения энергии при гармонических колебаниях 23
§ 12. Затухающие колебания . . 24
§ 13. Вынужденные колебания 25
§ 14. Резонанс 27
§ 15. Применение резонанса и борьба с ним 29
§ 16. Роль маятника в часах. Автоколебания 30
Упражнение 1 32

Глава II. **Электрические колебания** 33

§ 17. Свободные и вынужденные электрические колебания . . . . . —
§ 18. Колебательный контур . . 35
§ 19. Аналогия между механическими и электрическими колебаниями 36
§ 20. Период свободных электрических колебаний. Уравнение, описывающее процессы в колебательном контуре 38
§ 21. Переменный электрический ток 41
§ 22. Активное сопротивление в цепи переменного тока . . 43
§ 23. Действующее значение силы тока и напряжения . . 44
§ 24. Емкость в цепи переменного тока 45
§ 25. Индуктивность в цепи переменного тока 47
§ 26. Закон Ома для электрической цепи переменного тока 50
§ 27. Мощность в цепи переменного тока 53
§ 28. Резонанс в электрической цепи 55
§ 29. Трехэлектродная электронная лампа 59
§ 30. Ламповый генератор . . 60
Упражнение 2 63

Глава III. **Производство, передача и использование электрической энергии** . . . 64

§ 31. Генерирование электрической энергии . . . . . —
§ 32. Генератор переменного тока 65
§ 33. Трансформатор 67
§ 34. Использование и производство электрической энергии 69
§ 35. Передача электроэнергии 72
§ 36. Успехи и перспективы электрификации СССР . . 74
Упражнение 3 75

Глава IV. **Механические волны. Звук** 76

§ 37. Волновые явления . . . —
§ 38. Распространение механических волн 79
§ 39. Длина волны. Скорость волны 81
§ 40. Волны в среде 83
§ 41. Звуковые волны 85
§ 42. Скорость звука 87
§ 43. Музыкальные звуки и шумы. Громкость и высота звука 88
§ 44. Акустический резонанс . . 90
§ 45. Ультразвук 91
§ 46. Интерференция волн . . 92
§ 47. Принцип Гюйгенса. Закон отражения волн 96
§ 48. Стоячие волны 98
§ 49. Дифракция волн 101
Упражнение 4 102

Глава V. **Электромагнитные волны** 103

§ 50. Связь между переменным электрическим полем и переменным магнитным полем —
§ 51. Электромагнитное поле . . 104
§ 52. Как передаются электромагнитные взаимодействия 105
§ 53. Электромагнитная волна 107
§ 54. Излучение электромагнитных волн 108
§ 55. Опыты Герца. Скорость электромагнитных волн . . 110
§ 56. Изобретение радио А. С. Поповым 112
§ 57. Принципы радиосвязи . . 114
§ 58. Амплитудная модуляция 116
§ 59. Детектирование 117
§ 60. Наблюдение свойств электромагнитных волн . . . 119
§ 61. Распространение радиоволн 120
§ 62. Радиолокация 121
§ 63. Понятие о телевидении . . 123
§ 64. Развитие средств связи в СССР 124
Упражнение 5 125

ОПТИКА

Введение 126

Глава VI. **Геометрическая оптика** 129

§ 65 Световые лучи . . . . . —
§ 66. Прямолинейное распространение света 130
§ 67. Фотометрия. Световой поток. Сила света 131
§ 68. Освещенность 133
Упражнение 6 135
§ 69. Закон отражения света. Изображение в плоском зеркале 136
§ 70. Сферическое зеркало . . 138
§ 71. Построение изображения в сферическом зеркале . . 140
Упражнение 7 142
§ 72. Закон преломления света 143
§ 73. Полное отражение . . . 146
§ 74. Ход лучей в треугольной призме 148
Упражнение 8 149
§ 75. Линза 150
§ 76. Построение изображения в линзе 154
§ 77. Формула тонкой линзы. Увеличение линзы . . . 156
§ 78. Фотоаппарат. Проекционный аппарат 158
§ 79. Глаз. Очки 160
§ 80. Лупа. Микроскоп 163
Упражнение 9 165

Глава VII. **Световые волны** . . 166

§ 81. Скорость света . . . . . —
§ 82. Вывод закона преломления света 168
§ 83. Дисперсия света 170
§ 84. Интерференция света . . 172
§ 85. Кольца Ньютона 173
§ 86. Длина световой волны . . 174
§ 87. Некоторые применения интерференции 176
§ 88. Дифракция света 178
§ 89. Дифракционная решетка 182
§ 90. Поперечность световых волн. Поляризация света 183
§ 91. Поперечность световых волн и электромагнитная теория света 187
Упражнение 10 188

Глава VIII. **Основы теории относительности** 189

§ 92. Законы электродинамики и принцип относительности —
§ 93. Опыт Майкельсона . . . 191
§ 94. Постулаты теории относительности 194
§ 95. Относительность одновременности 195
§ 96. Относительность промежутков времени 197
§ 97. Относительность расстояний 199
§ 98. Релятивистский закон сложения скоростей 202
§ 99. Зависимость массы от скорости. Релятивистская динамика 203
§ 100. Синхрофазотрон 205
§ 101. Связь между массой и энергией 207
Упражнение 11 209

Глава IX. **Излучение и спектры** 210

§ 102. Виды излучения. Источники света . . . . . —
§ 103. Распределение энергии в спектре 212
§ 104. Спектральные аппараты 213
§ 105. Типы спектров излучения 214
§ 106. Спектральный анализ . . 216

§ 107. Спектры поглощения . . 217
§ 108. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи . . . 218
§ 109. Рентгеновские лучи . . 219
§ 110. Шкала электромагнитных волн 222

Глава X. **Действия света. Световые кванты** 224

§ 111. Зарождение квантовой теории . . . . . —
§ 112. Фотоэффект 225
§ 113. Теория фотоэффекта . . 228
§ 114. Фотоны 229
§ 115. Применение фотоэффекта 231
§ 116. Давление света 232
§ 117. Химическое действие света. Фотография 234
§ 118. Запись и воспроизведение звука в кино 236
Упражнение 12 237

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Введение 238

Глава XI. **Атомиая физика** . . 239

§ 119. Строение атома. Опыты Резерфорда . . . . . —
§ 120. Планетарная модель атома 241
§ 121. Постулаты Бора 242
§ 122. Модель атома водорода по Бору 243
§ 123. Экспериментальное доказательство существования стационарных состояний 247
§ 124. Трудности теории Бора. Квантовая механика . . 249
§ 125. Квантовые источники света — лазеры . . . . . —
Упражнение 13 252

Глава XII. **Физика атомного ядра** 253

§ 126. Атомное ядро и элементарные частицы . . . . —
§ 127. Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц . . . . . —
§ 128. Открытие естественной радиоактивности . . . 257
§ 129. Альфа-, бета- и гамма-излучения 258
§ 130. Радиоактивные превращения 261
§ 131. Закон радиоактивного распада. Период полураспада 263
§ 132. Изотопы 264
§ 133. Правило смещения . . . 266
§ 134. Искусственное превращение атомных ядер . . . 267
§ 135. Открытие нейтрона . . 268
§ 136. Строение атомного ядра. Ядерные силы 269
§ 137. Энергия связи атомных ядер 270
§ 138. Искусственная радиоактивность 272
§ 139. Ядерные реакции . . . 274
§ 140. Деление ядер урана . . 275
§ 141. Цепные ядерные реакции 277
§ 142. Ядерный реактор . . . 279
§ 143. Применение ядерной энергии 282
§ 144. Применение радиоактивных изотопов в науке и технике 283
§ 145. Термоядерные реакции . 286
§ 146. Биологическое действие радиоактивных излучений 287
Упражнение 14 288

Глава XIII. **Элементарные частицы** 289

§ 147 Что такое элементарная частица? . . . . . —
§ 148. Открытие позитрона. Античастицы 291
§ 149. Распад нейтрона. Открытие нейтрино 293
§ 150. Сколько существует элементарных частиц? . . . 295

Значение физики для объяснения мира и развития производительных сил общества 298

§ 151. Единая физическая картина мира . . . . . —
§ 152. Физика и научно-техническая революция 301

Задачи на повторение 305

Лабораторные работы 308

Ответы к упражнениям 312

Предметный указатель 314

Геннадий Яковлевич Мякишев

Борис Борисович Буховцев

ФИЗИКА

Учебник для 10 класса средней школы

Редактор *Г. Р. Лисенкер*
Обложка художника *М. К. Шевцова*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Цветн. вкл. художника *С. Ф. Лухина*
Художники *Ю. В. Сайчук, Б. Д. Константинов*
Технический редактор *Н. Н. Махова*
Корректор *Г. С. Попкова*

ИБ № 6367

Подписано к печати с диапозитивов 01.04.81. 60×90/16. Бумага офсетная № 2. Гарн. литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20+вкл. 0,25+форз. 0,25. Усл. кр. отт. 42,31. Уч.-изд. л. 21,02+вкл. 0,24+форзац 0,44. Тираж 1 405 000 экз. Заказ № 1009. Цена 40 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

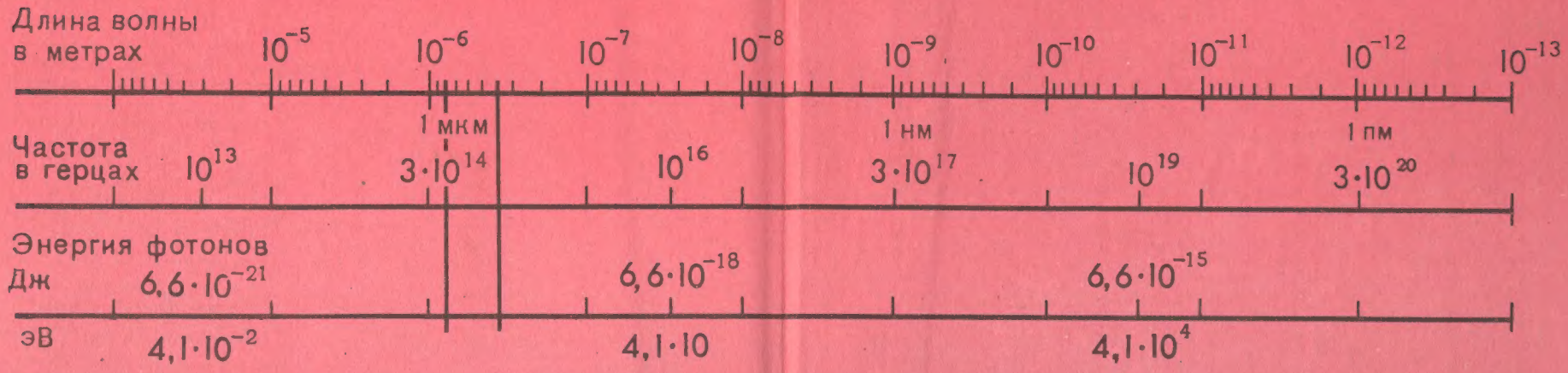
Отпечатано с диапозитивов ордена Трудового Красного Знамени типографии издательства ЦК КП Белоруссии на Калининском ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинате детской литературы им. 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата РСФСР. Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.

Сведения о пользовании учебником

№	Фамилия и имя ученика	Учебный год	Состояние учебника	
			в начале года	в конце года
1				
2				
3				
4				

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛЕКУЛ, АТОМОВ И ЯДЕР

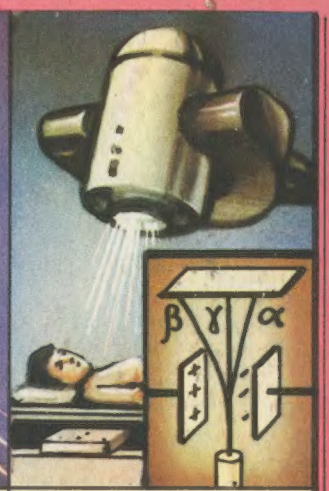


ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ

Школьные учебники СССР

sheba.spb.ru/shkola